



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil

2015

**Pedro  
Moisés  
Teixeira  
Roque**

**Utilização de materiais de mudança de  
fase na melhoria do comportamento  
térmico de edifícios**





**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Civil

**2015**

**Pedro  
Moisés  
Teixeira  
Roque**

**Utilização de materiais de mudança de  
fase na melhoria do comportamento  
térmico de edifícios**

Dissertação a ser apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica da Professora Doutora Maria Fernanda Rodrigues, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho à minha família.



**o júri**  
presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida  
Professor adjunto do Instituto Politécnico – Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente  
Professor associado da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

O desenvolvimento desta dissertação não seria possível sem a excelente orientação do Professor Romeu da Silva Vicente, sempre disponível com uma palavra de incentivo e otimismo. Estou-lhe muito grato por todo o conhecimento transmitido, pela troca de ideias e pela sua capacidade de resolução dos problemas que surgiram ao longo desta dissertação.

À minha co-orientadora Professora Fernanda Rodrigues, pela sua preocupação, palavras amigas e de incentivo e pelas valiosas sugestões e ajuda fornecidas durante a preparação desta dissertação.

Um obrigado a todos os colegas que conheci na Universidade de Aveiro pelo companheirismo, em especial ao Marco Nascimento e André Reis, por todo o apoio, ajuda, pelos bons momentos de convívio e amizade que me proporcionaram ao longo da minha vida universitária.

Aos meus pais, José Roque e Maria Teixeira, sem eles não seria possível este percurso académico, por todo o esforço em me concederem as condições para realizar este projeto, pelo carinho e pela forma como me educaram e acompanharam ao longo de toda a minha vida.

Um agradecimento especial à minha namorada, Emy Soares, por todo o apoio, carinho, ajuda, pelo amor incondicional e por me aturar nas horas de maior stress, que nem sempre foi fácil.

A toda a minha família pelo apoio e palavras de motivação ao longo da minha vida.

Muito obrigado



**palavras-chave**

REH, Design Builder software, materiais mudança de fase, simulação, PCM.

**resumo**

A utilização de materiais de mudança de fase tem vindo a ganhar maior destaque nos últimos anos, como forma de redução das necessidades energéticas. Os PCMs são materiais com a capacidade de alterar o seu estado físico mediante a variação da temperatura, absorvendo ou libertando calor para o meio envolvente. A incorporação de PCM em materiais de construção permite armazenar grandes quantidades de energia e dessa forma reduzir as flutuações de temperatura interior, reforçando o conforto térmico e reduzindo as necessidades energéticas associadas à climatização. A presente tese foca-se no estudo da aplicação de PCM através de um *software* de simulação dinâmica, o *DesignBuilder*, com vista à compreensão do funcionamento do material e o seu efeito no consumo energético. A célula definida para o estudo, com uma geometria simples, foi parametrizado tendo como base alguns dados de referência fornecidos pelo REH. Estudou-se a aplicação para 7 localizações distintas, em Portugal, com PCMs de diferentes pontos de fusão, em sistema passivo, indicando posteriormente a melhor solução relativamente a temperaturas máximas, amplitudes térmicas e necessidades de aquecimento e arrefecimento, para cada caso. Foi também analisado alguns parâmetros, com vista a melhorar o desempenho térmico, para uma das localizações, nomeadamente medidas de ventilação e limitação de ganhos solares. No final foi efetuado um estudo mais pormenorizado, em sistema ativo, reduzindo a incorporação de PCM à zona mais desfavorável da célula. Os resultados demonstraram a relevância da incorporação destes materiais na envolvente do edifício, permitindo uma redução significativa tanto nos picos de temperatura máxima como nas necessidades energéticas.



**keywords**

REH, Design Builder software, phase change materials, simulation, PCM

**abstract**

The use of phase change materials has been gaining more relevance in recent years as a way to reduce energy requirements. The PCMs are materials with the ability to change their physical state by varying the temperature, absorbing or releasing heat to the surrounding environment. The incorporation of PCM in building materials allows to store large amounts of energy and thus reduce the indoor temperature fluctuations, enhancing the thermal comfort and reducing energy requirements associated with air conditioning. This thesis focuses on the study of PCM application using a dynamic simulation software, DesignBuilder, in order to understand the functioning of the material and its effect on energy consumption. The cell defined for the study, with a simple geometry, was parameterized based on some reference data provided by the REH. It was studied the application of PCM for 7 different locations, in Portugal, with PCMs of different melting points, in passive system, later indicating the best solution regarding maximum temperatures, temperature ranges and heating and cooling needs in each case. It was also examined some parameters, to improve thermal performance, in one of the locations, in particular ventilation and measures to limit solar gains. At the end it was made a more detailed study, in active system, reducing the incorporation of PCM to the most unfavorable area of the cell. The results showed the importance of inclusion of these materials in the building envelope allowing a significant reduction in both the maximum peak temperature as the energy needs.



# ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XXV</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	2
1.2 CONFORTO EM EDIFÍCIOS .....	2
1.3 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA .....	3
1.4 OBJETIVOS .....	4
1.5 METODOLOGIA DO ESTUDO .....	5
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	5
<b>CAPÍTULO 2. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE.....</b>	<b>8</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	8
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE.....	9
2.2.1 PCMs comerciais .....	11
2.3 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO .....	12
2.4 INCORPORAÇÃO DE PCM EM ELEMENTOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	14
2.4.1 Introdução .....	14
2.4.2 Encapsulamento de materiais de mudança de fase .....	14
<b>CAPÍTULO 3. APLICAÇÕES DOS PCMS .....</b>	<b>20</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	20
3.2 APLICAÇÕES DOS PCMS EM EDIFÍCIOS .....	21
3.3 CLASSIFICAÇÃO DAS APLICAÇÕES DOS PCMS EM EDIFÍCIOS .....	22
3.4 APLICAÇÕES PASSIVAS DE PCM.....	22
3.4.1 Parede trombe .....	23
3.4.2 Envidraçados.....	24
3.4.3 Utilização de PCM em proteção solar.....	25
3.4.4 Betão .....	25
3.4.5 Painéis de gesso cartonado .....	26
3.5 APLICAÇÕES ATIVAS DE PCM.....	27
3.5.1 Aquecimento de piso .....	27
3.5.2 Ventilação noturna .....	27
<b>CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO DINÂMICA .....</b>	<b>30</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	30

4.2	PROCEDIMENTO DA SIMULAÇÃO DINÂMICA .....	30
4.3	ENERGYPLUS.....	31
4.4	DESIGNBUILDER.....	32
4.4.1	Interface.....	32
<b>CAPÍTULO 5.</b>	<b>CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>36</b>
5.1	PROCEDIMENTO.....	36
5.2	SELEÇÃO DAS ZONAS .....	37
5.2.1	Dados climáticos.....	40
5.3	CÉLULA DE TESTE.....	41
5.3.1	Modelo geométrico .....	41
5.3.2	Orientação da célula de teste .....	42
5.3.3	Solução construtiva .....	44
5.3.3.1	Materiais de construção.....	44
5.3.3.2	Envidraçados .....	50
5.3.4	Climatização .....	50
5.3.5	Atividade.....	51
5.3.6	Seleção dos PCM's .....	52
5.4	ESTUDO DE SENSIBILIDADE .....	53
5.5	ESTUDO COM SISTEMA ATIVO .....	55
5.6	OPÇÕES AVANÇADAS DE CÁLCULO .....	57
5.6.1	Aplicação de materiais de mudança de fase no DesignBuilder .....	57
<b>CAPÍTULO 6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>60</b>
6.1	SIMULAÇÃO DA CÉLULA DE TESTE.....	60
6.1.1	1ª Fase de simulações.....	61
6.1.2	2ª Fase de simulações.....	63
6.1.3	3ª fase de simulações .....	92
6.2	ESTUDO DE SENSIBILIDADE .....	97
6.2.1	Ventilação noturna .....	97
6.2.2	Elementos de proteção solar e sombreamento .....	98
6.2.3	Área do envidraçado.....	99
6.3	SISTEMA ATIVO .....	100
6.3.1	Identificação das zonas desfavoráveis.....	100
6.3.2	Custos .....	102
<b>CAPÍTULO 7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>104</b>
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	104
7.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	106



<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
<b>A. ANEXOS .....</b>	<b>116</b>
A.1 CURVAS TEMPERATURA-ENTALPIA DOS PCM UTILIZADOS .....	116
A.2 RADIAÇÃO SOLAR NA SEMANA CRÍTICA DE INVERNO .....	120



---

**Índice de figuras**

Figura 1.1– Diferentes tipos de armazenamento de energia térmica	3
Figura 2.1– Diagrama de mudança de fase sólido-líquido de PCMs	8
Figura 2.2- Imagem ilustrativa do Microencapsulamento de PCM (Microtek Laboratories, 2010).	15
Figura 2.3 - Diferentes formas geométricas para encapsulamento de PCM (a) – esférica (b) – tubular (c) – cilíndrica e (d) rectangular (Salunkhe and Shembekar, 2012).	16
Figura 2.4 – Rolo de BioPCM (phasechangeenergy.com).	17
Figura 2.5 – Princípio operativo do BioPCM (phasechangeenergy.com).	17
Figura 3.1– Funcionamento de uma parede de trombe consoante a estação do ano (Swet, 1980)	23
Figura 3.2 <i>Set-up</i> experimental (Weinläder et al., 2005).	25
Figura 3.3 Sistema <i>free-cooling</i> desenvolvido por Kang (Kang et al., 2003).	28
Figura 4.1 – Descrição da hierarquia definida no programa DesignBuilder.	33
Figura 4.2 – Pormenor do resultado final, apresentado na forma de gráficos e tabelas.	34
Figura 5.1 – Zonas climáticas de Portugal para a estação de Inverno e Verão.	39
Figura 5.2 - Renderização do modelo geométrico criado no Designbuilder, vista do alçado Sul.	41
Figura 5.3 - Renderização do modelo geométrico criado no Designbuilder, vista do alçado Norte.	41
Figura 5.4 – Radiação Solar nas fachadas (Inverno) (Gonçalves and Graça, 2004).	43
Figura 5.5 – Radiação Solar nas fachadas (Verão) (Gonçalves and Graça, 2004).	43
Figura 5.6 – Representação esquemática da parede dupla de alvenaria de tijolo de 15cm e 11cm com caixa-de-ar parcialmente preenchida com 6cm de poliestireno extrudido (XPS).	44
Figura 5.7 – Representação esquemática da parede dupla de alvenaria de tijolo de 7 cm com caixa-de-ar parcialmente preenchida com 3cm de lã de rocha.	45
Figura 5.8 – Representação esquemática do pavimento térreo	46

Figura 5.9 – Representação esquemática da cobertura plana	47
Figura 5.10 - Pormenor do separador <i>openings</i>	50
Figura 5.11 – Gráfico ilustrativo da variação de densidade do PCM 18, com densidade de 800kg/m <sup>3</sup> e 230kg/m <sup>3</sup> , PCM 18 e PCM 18-230 respetivamente.	53
Figura 5.12 – Pormenor da célula de teste.	54
Figura 5.13 – Renderização do modelo geométrico criado no Designbuilder, vista do alçado Sul, com exposição solar do dia 9 Julho às 9:00.	54
Figura 5.14 - Renderização do modelo geométrico criado no Designbuilder, vista do alçado Norte, com exposição solar do dia 9 Julho às 9:00.	55
Figura 5.15 - Janela de edição dos parâmetros de cálculo.	58
Figura 6.1 – Ilustração da constituição da parede exterior com PCM pelo interior	60
Figura 6.2 - Ilustração da constituição da cobertura com PCM pelo interior	61
Figura 6.3 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo de 2 dias da semana mais quente, 15-16 Julho, em Lisboa.	62
Figura 6.4 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, 15-16 de Julho, com e sem PCM, para Lisboa.	63
Figura 6.5 – Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 15-21 Julho, em Lisboa.	64
Figura 6.6 – Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, de Julho, com e sem PCM, em Lisboa.	65
Figura 6.7 – Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Lisboa.	66
Figura 6.8 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 22-28 Janeiro, em Lisboa.	67
Figura 6.9 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Lisboa.	67
Figura 6.10 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Lisboa.	68

Figura 6.11 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 5-11 Agosto, em Porto.	69
Figura 6.12 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Porto.	69
Figura 6.13 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Porto.	70
Figura 6.14 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 01-07 Janeiro, em Porto.	71
Figura 6.15 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Porto.	71
Figura 6.16 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Porto.	72
Figura 6.17 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 19-25 Agosto, em Évora.	73
Figura 6.18 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Évora.	73
Figura 6.19 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Évora.	74
Figura 6.20 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 15-21 Janeiro, em Évora.	75
Figura 6.21 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Évora.	75
Figura 6.22 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Évora.	76
Figura 6.23 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 10-16 Agosto, em Viseu.	77
Figura 6.24 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Viseu.	77
Figura 6.25 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Viseu.	78

Figura 6.26 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 06-12 Janeiro, em Viseu.	79
Figura 6.27 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Viseu.	79
Figura 6.28 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Viseu.	80
Figura 6.29 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 15-21 Julho, em Aveiro.	81
Figura 6.30 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Aveiro.	81
Figura 6.31 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Aveiro.	82
Figura 6.32 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 05-11 Fevereiro, em Aveiro.	83
Figura 6.33 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Aveiro.	83
Figura 6.34 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Aveiro.	84
Figura 6.35 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 03-09 Agosto, em Lamego.	85
Figura 6.36 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Lamego.	85
Figura 6.37 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Lamego.	86
Figura 6.38 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 22-28 Janeiro, em Lamego.	87
Figura 6.39 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Lamego.	87
Figura 6.40 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Lamego.	88

Figura 6.41 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 27-02 Julho/Agosto, em Bragança.	89
Figura 6.42 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Bragança.	89
Figura 6.43 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Bragança.	90
Figura 6.44 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 08-14 Dezembro, em Bragança.	91
Figura 6.45 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Bragança.	91
Figura 6.46 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Bragança.	92
Figura 6.47 – Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Lisboa.	93
Figura 6.48 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Porto.	94
Figura 6.49 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Évora.	94
Figura 6.50 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Viseu.	95
Figura 6.51 – Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Aveiro.	96
Figura 6.52 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Lamego.	96
Figura 6.53 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Bragança.	97
Figura 6.54 – Variação das necessidades energéticas de climatização com as rph de ventilação noturna, de 1 a 10rph.	98
Figura 6.55 – Variação das necessidades energéticas de climatização com o tipo de proteção solar/sombreamento.	99

Figura 6.56 – Variação das necessidades energéticas de climatização com área de envidraçado.	100
Figura 6.57 - Variação da temperatura, sem PCM, por zona, ao longo do ano.	101
Figura 6.58 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, com sistema ativo.	102
Figura A.1 – Curva temperatura-entalpia do PCM Rubitherm RT15	116
Figura A.2 - Curva temperatura-entalpia do PCM Rubitherm RT18HC	117
Figura A.3 - Curva temperatura-entalpia do PCM BioPCM Q21	117
Figura A.4 - Curva temperatura-entalpia do PCM BioPCM Q23	118
Figura A.5 - Curva temperatura-entalpia do PCM BioPCM Q25	118
Figura A.6 - Curva temperatura-entalpia do PCM BioPCM Q27	119
Figura A.7 - Curva temperatura-entalpia do PCM BioPCM Q29	119
Figura A.8 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 22-28 Janeiro, em Lisboa.	120
Figura A.9 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 01-07 Janeiro, no Porto.	120
Figura A.10 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 15-21 Janeiro, em Évora.	120
Figura A.11 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 06-12 Janeiro, no Viseu.	120
Figura A.12 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 5-11 Fevereiro, em Aveiro.	121
Figura A.13 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 22-28 Dezembro, em Lamego.	121
Figura A.14 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 8-14 Dezembro, em Bragança.	121



## **Índice de tabelas**

Tabela 2.1– Lista de PCMs	10
Tabela 2.2– Lista de vantagens e desvantagens dos PCMs	10
Tabela 2.3– PCMs comerciais(Tyagi and Buddhi, 2007, Pasupathy et al., 2008b)	12
Tabela 3.1 - Aplicações de PCMs	20
Tabela 4.1 - Inputs e Outputs do Energyplus	31
Tabela 5.1 – NUTS III	37
Tabela 5.2 – Combinações de zonas climáticas com o número de graus-dias	40
Tabela 5.3 – Propriedades das camadas de constituição da parede dupla da envolvente exterior	45
Tabela 5.4 – Propriedades da caixa-de-ar da parede dupla da envolvente exterior	45
Tabela 5.5 - Propriedades da caixa-de-ar da parede dupla da envolvente interior	46
Tabela 5.6 - Propriedades das camadas de constituição do pavimento térreo	47
Tabela 5.7 - Propriedades da caixa-de-ar do pavimento térreo	47
Tabela 5.8 - Propriedades das camadas de constituição da cobertura plana	48
Tabela 5.9 – Propriedades da caixa-de-ar da cobertura plana	48
Tabela 5.10 – Caracterização da envolvente para Uref	48
Tabela 5.11 – Listagem das zonas térmicas	55
Tabela 5.12 - Descrição da iluminação considerada no sistema ativo	56
Tabela 5.13 – Descrição do equipamento elétrico considerado	57
Tabela 7.1 – Temperaturas de fusão dos PCM com melhor desempenho nas semanas críticas do Verão e Inverno, em °C.	104
Tabela 7.2 - Temperaturas de fusão dos PCM com melhor desempenho nas estações de aquecimento e arrefecimento, em °C.	105



---

# *Capítulo 1*

## *Introdução*

## Capítulo 1. Introdução

### 1.1 Considerações gerais

A energia é um bem essencial ao Homem, para o seu bem-estar e para permitir o seu progresso e evolução. Este bem tem-se tornado cada vez mais escasso e como tal o seu preço torna-se cada vez mais elevado. Portugal importa grande parte da energia primária que consome, o que fragiliza a economia e a sociedade em geral, tornando-as dependentes do exterior. (Envienergy)

É necessária uma grande quantidade de energia para aquecer divisões no inverno e arrefecê-las no verão. Por norma, metade da energia utilizada numa casa comum é para a climatização desta, o que representa quase 9% da energia total consumida no país.

Um bom isolamento é muito importante, pois permite reduzir as perdas de calor que escapam pelo teto e pelas paredes de uma habitação. Uma forma de melhorar as características de isolamento da habitação, será com a incorporação de materiais de mudança de fase. Estes materiais permitem a redução dos consumos energéticos necessários para se garantir conforto e bem-estar aos ocupantes de um edifício. Através da incorporação destes materiais, denominados de PCM (*Phase change material*), na estrutura e revestimento do edifício, é possível manter temperaturas baixas durante o dia, e de noite, com a descida da temperatura exterior, aquecer o ambiente. Estes materiais são capazes de absorver uma grande quantidade de energia térmica e libertá-la posteriormente, contribuindo para o conforto térmico sem que seja necessário um aumento dos consumos energéticos inerentes ou gastos adicionais de energia em climatização do espaço.

Este trabalho forçar-se-á na simulação de um caso de estudo com uma construção semelhante à convencional portuguesa. Assim, será feito um estudo paramétrico sobre a aplicação de diferentes PCM em diversas zonas de Portugal com condições características.

### 1.2 Conforto em edifícios

O conforto humano num edifício é um ponto importante a ter em conta num projeto de construção. O conforto num edifício depende de vários fatores como o design, a natureza,

o uso do edifício, o número de ocupantes no local do edifício, os sistemas de aquecimento e arrefecimento, ventilação natural, etc. A condição de conforto não pode ser definida como qualquer termo específico, uma vez que varia de acordo com a necessidade do utilizador e de acordo com a condição circundante.

Existem alguns parâmetros que definem o ambiente interno e contribuem para a condição de conforto no edifício. Alguns destes parâmetros são: acústica, qualidade do ar interior, conforto visual e conforto térmico. Cada um destes parâmetros tem um efeito sobre a saúde e a produtividade dos ocupantes e é essencial para alcançar um nível adequado de todos eles para o sucesso do edifício (Taylor et al., 2008, Wagner et al., 2007). Conforto térmico é definido pela sensação de bem-estar, relacionado com a temperatura. Trata-se então de encontrar um equilíbrio entre o calor produzido pelo corpo com o calor que se perde para o ambiente na sua envolvente.

### 1.3 Armazenamento de energia térmica

A acessibilidade e necessidade de energia muitas vezes não são correspondidos, dessa forma o armazenamento de energia térmica assume um papel fundamental, este pode ser armazenado e recuperado através de uma mudança na energia interna de um material em forma de calor sensível, calor latente, e também em reacções termoquímicas ou combinação destes.

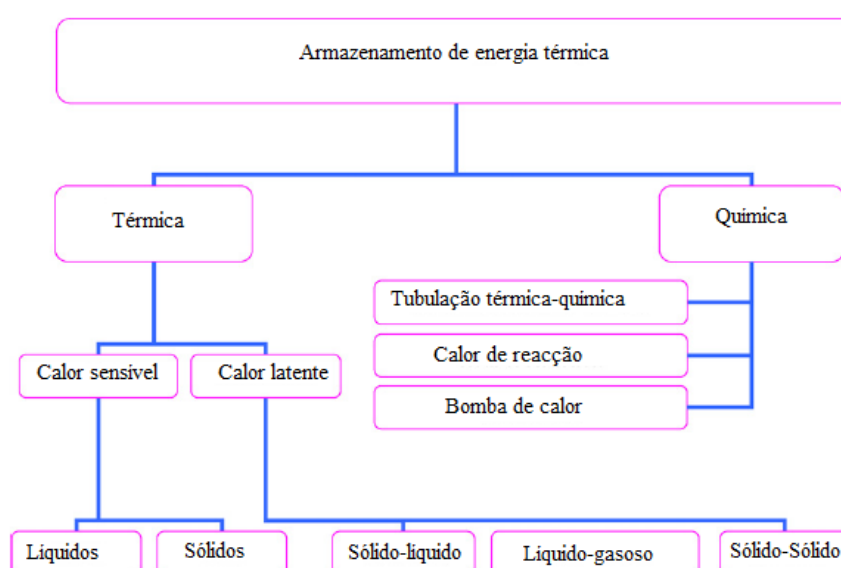


Figura 1.1– Diferentes tipos de armazenamento de energia térmica

No armazenamento de calor sensível, a energia térmica é armazenada, aumentando a temperatura de um sólido ou líquido. Este sistema utiliza a capacidade de calor e a alteração na temperatura do material durante o processo de carga e descarga. O armazenamento de calor latente baseia-se na absorção ou libertação de calor, quando um material de armazenamento passa por uma mudança de fase de sólido para líquido ou líquido para o gasoso, ou vice-versa. Sistemas de armazenamento térmico-químicos contam com a energia absorvida e libertada ao romper ligações moleculares numa reação química completamente reversível. Entre as técnicas acima de armazenamento térmico, o armazenamento de calor latente é particularmente atrativo devido à sua capacidade de fornecer energia de alta densidade de armazenamento e as suas características de armazenamento de calor a uma temperatura constante, correspondente à temperatura de mudança de fase do PCM (Pasupathy et al., 2008b).

O armazenamento de calor latente por meio de materiais de mudança de fase é particularmente atraente devido à sua capacidade de fornecer uma alta densidade de armazenamento de energia, para além que os requisitos de espaço necessários são mais baixos que a maioria dos sistemas de climatização. Por outro lado é necessário um maior cuidado no planeamento, na escolha e aplicação dos PCM, devido aos ciclos de carga-descarga diários destes.

## **1.4 Objetivos**

Esta dissertação tem como principal objetivo contribuir para o aumento do conhecimento no estudo de sistemas de armazenamento de energia térmica baseados na mudança de fase de PCM e no potencial da aplicação deste tipo de material na construção, respeitando a legislação nacional. Será importante verificar se com a incorporação de materiais de mudança de fase num determinado ambiente é possível obter benefícios no conforto térmico dos ocupantes e redução do consumo energético, avaliando o seu comportamento nas estações de arrefecimento e aquecimento.

Inicialmente pretendeu-se fazer uma recolha bibliográfica detalhada sobre PCMs, dando a conhecer um pouco sobre este tipo de materiais. Posteriormente será analisado um caso de estudo, nomeadamente uma célula de teste, com  $100m^2$  através de um programa de modelação, que nos permite fazer a simulação do comportamento térmico de um

compartimento com e sem a utilização de materiais de mudança de fase, para climas característicos.

Pretende-se que este estudo tenha aplicação direta em projetos de engenharia futuros, com vista a melhoria do conforto térmico e a poupança económica a longo prazo.

## **1.5 Metodologia do estudo**

Para efeito de estudo optou-se por fazer duas análises distintas do modelo geométrico em estudo.

Em sistema passivo:

- Aplicação de PCMs com temperatura de transição elevadas, 23, 25, 27 e 29 °C, nas paredes e tetos da célula de teste, simulando o seu comportamento na estação de arrefecimento;
- Aplicação de PCMs com temperaturas de transição mais baixas, 15, 18 e 21 °C, nas paredes e tetos da célula de teste, simulando o seu efeito nas temperaturas interiores durante a estação de aquecimento;
- Combinação dos PCMs de baixas e elevadas temperaturas, de modo a construir uma solução otimizada que desse resposta às necessidades de verão e inverno numa zona climática selecionada.

Em sistema ativo:

- Aplicação da combinação de PCMs otimizada, fazendo o estudo por zonas da célula de teste, de forma a encontrar a melhor solução térmica e económica, considerando ganhos internos.

Em todas as análises foram realizadas diversas simulações, de forma a encontrar a solução mais eficiente.

## **1.6 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos.

No primeiro capítulo é apresentado os objetivos do trabalho, a metodologia usada, bem como uma breve descrição de cada capítulo.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica abordando a temática de PCM. É explicado o conceito de PCM e são apresentados os diversos materiais existentes, como também a sua classificação, os critérios de seleção bem como as vantagens e desvantagens de cada um.

No terceiro capítulo refere-se à aplicação dos PCMs, é feita uma descrição das várias formas de incorporação de materiais mudança de fase em materiais e aplicação em elementos construtivos, ativa e passiva.

No quarto capítulo é feita uma introdução à simulação dinâmica e ao software usado no presente estudo.

No quinto capítulo refere-se ao caso de estudo e a sua renderização no programa, são apresentadas as características do modelo de simulação desde a envolvente à escolha dos PCMs em análise.

No sexto capítulo é feita a análise detalhada dos resultados obtidos com a simulação dinâmica.

No sétimo capítulo são expostas as principais conclusões, bem como algumas sugestões de trabalho futuro.

Os anexos complementam a informação contida na estrutura do trabalho.



---

## *Capítulo 2*

### *Materiais de mudança de fase*

## Capítulo 2. Materiais de mudança de fase

### 2.1 Introdução

Os materiais mudança de fase ou PCMs (*phase change materials*) são materiais de armazenamento de energia que têm densidades de armazenamento de energia térmica consideravelmente maiores em comparação com os materiais de armazenamento de calor sensível. (Regin et al., 2008) Os PCMs absorvem e libertam grandes quantidades de calor a temperatura constante de transição de fase quando se submetem a mudança de fase como mostra na Figura 2.1 (Hasan et al., 2010).

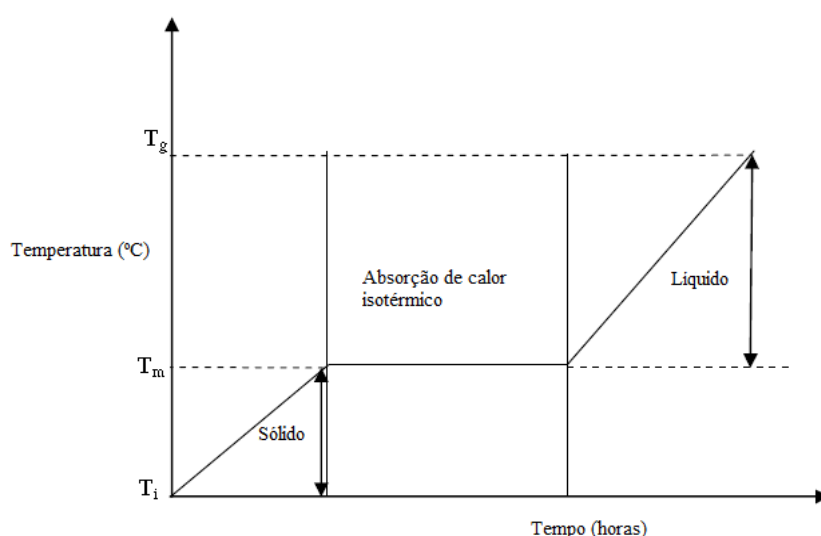


Figura 2.1– Diagrama de mudança de fase sólido-líquido de PCMs

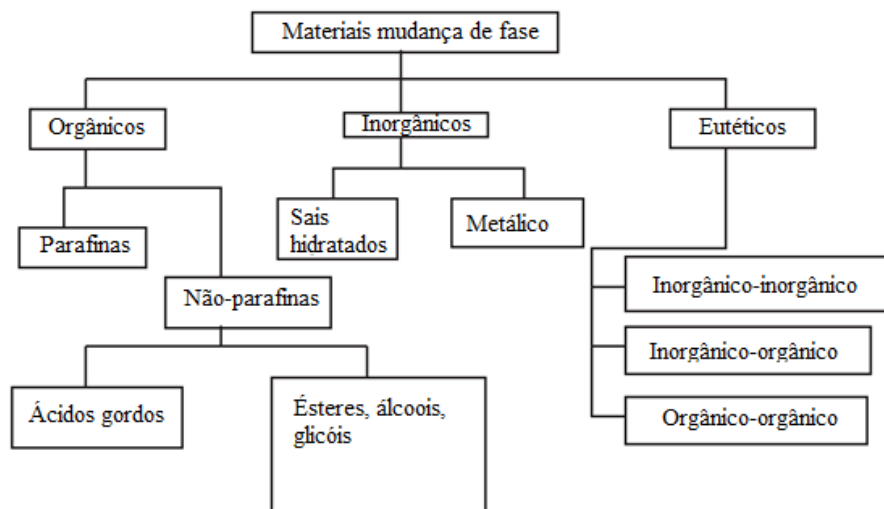
Segundo (Banaszek et al., 2005) em materiais puros a transição da fase líquida/sólida ocorre a uma temperatura  $T_m$  distinta (temperatura de equilíbrio de fusão/solidificação). Para a transformação de fase que ocorre na temperatura de equilíbrio, o calor latente de fusão corresponde à diferença dos produtos de densidades das fases sólida e líquida e entalpias específicas à temperatura  $T_m$ . De uma forma resumida, quando a temperatura de um determinado espaço atinge um valor correspondente ao ponto de transição entre o estado sólido-líquido, o PCM, incorporado no material construtivo, absorve o calor e limita o seu fluxo para o interior do edifício, liquidificando nesse processo. Quando se verifica uma descida da temperatura do espaço abaixo do ponto de transição líquido-sólido irá ocorrer o processo inverso, em que o PCM solidifica, libertando energia e dessa forma adiando o arrefecimento do espaço interior.

## 2.2 Classificação dos materiais de mudança de fase

Tendo em conta o estado de mudança de fase, os PCMs podem ser divididos em 3 grupos: sólido-sólido, sólido-líquido, líquido-gás.

De entre eles, o melhor para armazenamento de energia térmica é o PCM sólido-líquido.(Zhou et al., 2012)

Os PCMs sólido-líquido compreendem PCMs orgânicos, inorgânicos e PCMS eutéticos, como ilustrado na Figura 2.2.



**Figura 2.2 – Classificação dos PCMs (Jurinak and Abdel-Khalik, 1978)**

Um grande número de PCMs estão disponíveis em qualquer gama de temperatura requerida, na Tabela 2.1 é apresentado alguns dos PCMs entre 20 e 30 °C e na Tabela 2.2 são apresentadas as vantagens e desvantagens dos diversos PCMs (Kuznik et al., 2011, Baetens et al., 2010, Oliver et al., 2012, Pasupathy et al., 2008b, Jeon et al., 2012, Zhou et al., 2012).

Tabela 2.1– Lista de PCMs

	PCM	Temperatura de mudança de fase (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)
PCMs orgânicos	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOC}_3\text{H}_7$ (Palmitato de propilo)	19	186
	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_26\text{COO}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$ (Estereato de butilo)	19	140
	Parafina $\text{C}_{16}\text{--C}_{18}$	20-22	152
	Parafinas $\text{C}_{13}\text{--C}_{24}$	22	189
	Poliglicol E600	22	127.2
PCMs inorgânicos	$\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	18.5	231
	$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25.8	125.9
	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29	190.8
	$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	30	296
PCMs eutéticos	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2 + \text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	24	147.7
	$\text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25	95
	$\text{CH}_3\text{CONH}_2 + \text{NH}_2\text{CONH}_2$	27	163
	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	136

Tabela 2.2– Lista de vantagens e desvantagens dos PCMs

Classificação	Vantagens	Desvantagens
PCM orgânicos	1. Disponibilidade de uma variação de temperatura 2. Elevado calor de fusão 3. não superarrefecimento 4. Quimicamente estável e reciclável	1. Baixa condutividade térmica (em torno de 0,2 W / m K) 2. Mudança de volume relativamente grande 3. inflamabilidade

	5. Boa compatibilidade com outros materiais	
<b>PCM inorgânicos</b>	1. Geralmente baratos 2. Elevada densidade de armazenamento térmico 3. Temperatura de mudança de fase claramente definida 4. Não inflamáveis	1. O processo de encapsulamento e preparação para o seu uso geram alguns problemas 2. São suscetíveis a subarrefecimento 3. Potencialmente corrosivos
<b>PCM eutéticos</b>	1. Alta densidade de armazenamento térmico	1. Falta de dados de teste atualmente disponíveis de propriedades termofísicas 2. Custo elevado

### 2.2.1 PCMs comerciais

Em 1990, apenas cerca de 12 empresas, principalmente nos EUA, foram envolvidas na fabricação de produtos de armazenamento de calor. Atualmente, as principais empresas de fornecimento no mercado de materiais de mudança de fase e de materiais de armazenamento de frio incluem Cristopia (França), TEAP Energia (Austrália), Rubitherm GmbH (Alemanha), EPS Ltd. (Reino Unido), Climator (Suécia) e Mitsubishi Chemical (Japão). (Kenisarin and Mahkamov, 2007)

Na Tabela 2.3 são indicados alguns PCMs comerciais de maior relevância com temperatura de fusão/mudança de fase entre 20 e 30 °C. (Zhou et al., 2012)

**Tabela 2.3– PCMs comerciais(Tyagi and Buddhi, 2007, Pasupathy et al., 2008b)**

PCM	Temperatura de mudança de fase (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)	Fonte
RT 20	22	172	Rubitherm GmbH( <a href="http://www.rubitherm.de">www.rubitherm.de</a> )
RT 25	25	147	Rubitherm GmbH( <a href="http://www.rubitherm.de">www.rubitherm.de</a> )
STL 27	27	213	Mitsubishi Chemicals ( <a href="http://www.m-kagaku.co.jp">www.m-kagaku.co.jp</a> )
Climsel C23	23	148	Climator( <a href="http://www.climator.com">www.climator.com</a> )
Climsel C24	24	216	Climator( <a href="http://www.climator.com">www.climator.com</a> )
S 27	27	190	Cristopia( <a href="http://www.cristopia.com">www.cristopia.com</a> )
TH 29	29	188	TEAP( <a href="http://www.teappcm.com">www.teappcm.com</a> )
A 22	22	172	EPS Ltd ( <a href="http://www.epsLtd.co.uk">www.epsLtd.co.uk</a> )
SP 22 A 17	22	150	Rubitherm GmbH( <a href="http://www.rubitherm.de">www.rubitherm.de</a> )
Mikra Thermic	20	140	Micropolis( <a href="http://www.micropolis.pt">www.micropolis.pt</a> )
Micronal DS 5008	23	110	BASF( <a href="http://www.basf.com">www.basf.com</a> )

De referir que em Portugal, a empresa Micropolis já produz PCM, baseado em ceras de parafina.

### **2.3 Critérios de seleção**

Tendo em conta o crescente aumento do número de materiais de mudança de fase comercializados, encontrar aquele com as propriedades adequadas para uma determinada aplicação poderá ser um processo demorado. (Khare et al., 2012). Para que os materiais mudança de fase possam ser utilizados como matérias de armazenamento de calor latente,

é necessário possuir determinadas características (Osterman et al., 2012, Khare et al., 2012, Tyagi and Buddhi, 2007):

Propriedades físicas e térmicas:

- Temperatura de mudança de fase adequada à aplicação, que irá depender fundamentalmente de fatores exteriores, como as condições climáticas e a exposição solar;
- Elevado calor latente de fusão por unidade de volume, permitindo armazenar a maior quantidade de calor por mínimo de PCM;
- Elevado calor específico e elevada densidade;
- Elevada condutividade térmica tanto no estado sólido como no estado líquido, promovendo a transferência de calor.
- Pequenas mudanças de volume na mudança de fase e pequena pressão de vapor à temperatura de operação de forma a reduzir problemas de contenção e alterações na capacidade de armazenamento.

Propriedades cinéticas:

- Taxa de nucleação elevada para evitar sub-arrefecimento da fase líquida;
- Elevada taxa de crescimento de cristais, de modo que o sistema possa satisfazer a necessidade de recuperação de calor a partir do sistema de armazenamento.

Propriedades químicas:

- Ciclos de fusão-solidificação completamente reversíveis,
- Capacidade de suportar vários ciclos de mudança de fase, mantendo o mesmo comportamento.
- Sem corrosividade para os materiais de construção,
- Material não-tóxico, não-inflamável e não-explosivo, de forma a manter os níveis de segurança.

Aspeto económico:

- Esteja disponível a larga escala
- Baixo Custo

## **2.4 Incorporação de PCM em elementos e materiais de construção**

### **2.4.1 Introdução**

(Hawes et al., 1993) refere que os métodos mais promissores para a incorporação de PCM em elementos e materiais de construção são a incorporação direta, imersão ou encapsulamento.

A incorporação direta é o método mais simples, em que os PCMs, em forma líquida ou em pó, são adicionados diretamente nos materiais de construção, tais como o gesso, cimento ou argamassa, durante a sua produção. Não é necessário equipamento extra neste método, no entanto poderá haver problemas em termos de incompatibilidade com outros materiais de construção ou até fugas/derrames (Zhou et al., 2012).

A imersão é uma tecnologia em que os componentes da estrutura de construção, tais como gesso, tijolo ou betão, são mergulhados em PCM derretido ou dissolvido, que com a ajuda da elevação capilar, se entranham nos seus poros.

A imersão e a incorporação direta têm diferentes processos de operação, mas ambos incorporam os PCMs diretamente em materiais de construção. Tal como o processo de incorporação direta, a imersão também pode ter problemas de derrames, permitindo o PCM fluir para fora do sistema do material, como também problemas de incompatibilidade com outros materiais.

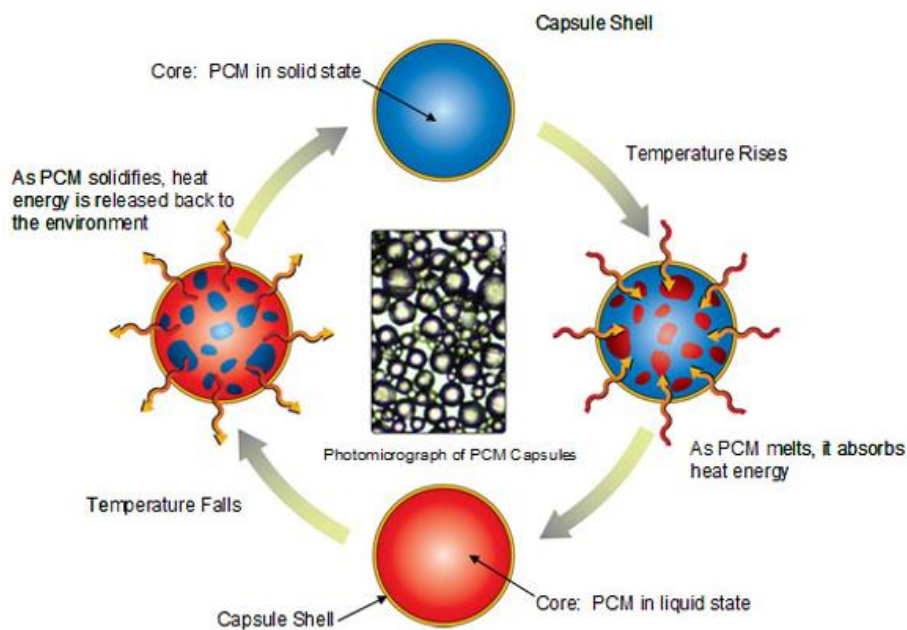
O encapsulamento é outra opção para incorporar o PCM em materiais de construção. Tal como o nome indica esta metodologia implica a encapsulação de PCM no invólucro de polímero geralmente feito pelo fabricante ou em outros materiais que possam ser incorporados no material de construção. Esta metodologia vem a reduzir os problemas de compatibilidade, bem como problemas de derrames. Será aprofundado no subcapítulo seguinte pela sua importância na presente tese.

### **2.4.2 Encapsulamento de materiais de mudança de fase**

O encapsulamento de PCMs tem desenvolvido um enorme interesse por parte de diversos investigadores. O encapsulamento é um processo de cobertura de um PCM (que forma a parte central do PCM encapsulado) com um revestimento ou material apropriado (Salunkhe and Shembekar, 2012).



Os materiais mudança de fase encapsulados consistem numa substância encapsulada com um elevado calor de fusão. O material mudança de fase absorve e liberta energia térmica, a fim de manter uma temperatura regulada dentro de um produto, tais como os têxteis, materiais de construção e embalagens. A parede da cápsula proporciona um recipiente microscópico para o PCM. Mesmo quando o núcleo estiver no estado líquido, as cápsulas ainda vão actuar como um sólido, prevenindo o PCM de “derreter” (Microtek Laboratories, 2010).



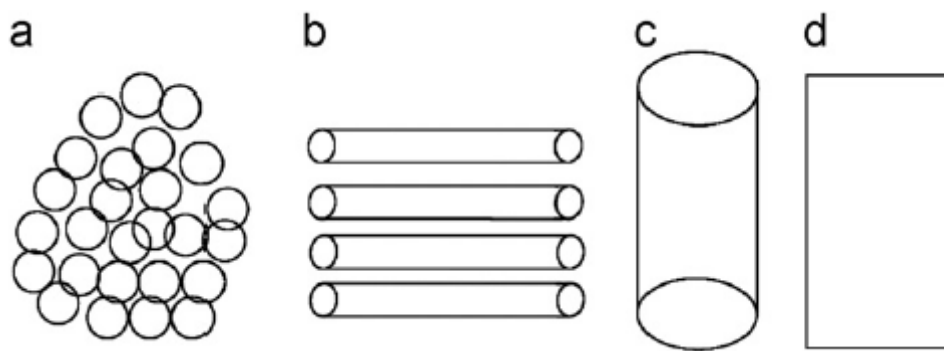
**Figura 2.2-** Imagem ilustrativa do Microencapsulamento de PCM (Microtek Laboratories, 2010).

O princípio demonstrado na figura pode ser explicado da seguinte forma: No estado sólido, o calor fornecido para o PCM aumenta a sua temperatura até atingir o ponto de fusão. Durante este processo de mudança de fase uma quantidade substancial de calor é armazenada. Quando exposto a uma temperatura inferior ao seu ponto de fusão, o PCM em estado líquido irá solidificar. A transformação de fase ocorre através da libertação de energia térmica durante o arrefecimento e o processo do estado de líquido para sólido. A mudança de fase do estado sólido para líquido e do estado líquido para sólido são denominados como carregamento e descarregamento, respetivamente (Salunkhe and Shembekar, 2012).

Tendo em conta o seu tamanho, podem ser classificados como:

- Macro (acima de 1 mm),
- Micro (0-1000  $\mu\text{m}$ ) e
- Nano (0-1000 nm) PCM encapsulados.

A forma do recipiente pode ser esférica, tubular, cilíndrica ou rectangular como é ilustrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Diferentes formas geométricas para encapsulamento de PCM (a) – esférica (b) – tubular (c) – cilíndrica e (d) rectangular (Salunkhe and Shembekar, 2012).**

O macro encapsulamento compreende a inclusão de PCM em alguma forma de recipiente, tais como tubos, bolsas, esferas, painéis ou outro recipiente. Estes recipientes podem servir directamente como permutadores de calor, ou podem ser incorporados em produtos de construção (Khudhair and Farid, 2004). Em (Salunkhe and Shembekar, 2012) é concluído que a forma esférica é a mais adequada para melhorar a taxa de condução de calor e evitar a corrosão do material da cápsula. Na Figura 2.4 encontra-se a solução comercial BioPCM, que será usado no presente estudo. Na Figura 2.5 é ilustrado o princípio operativo do BioPCM.



Figura 2.4 – Rolo de BioPCM (phasechangeenergy.com).

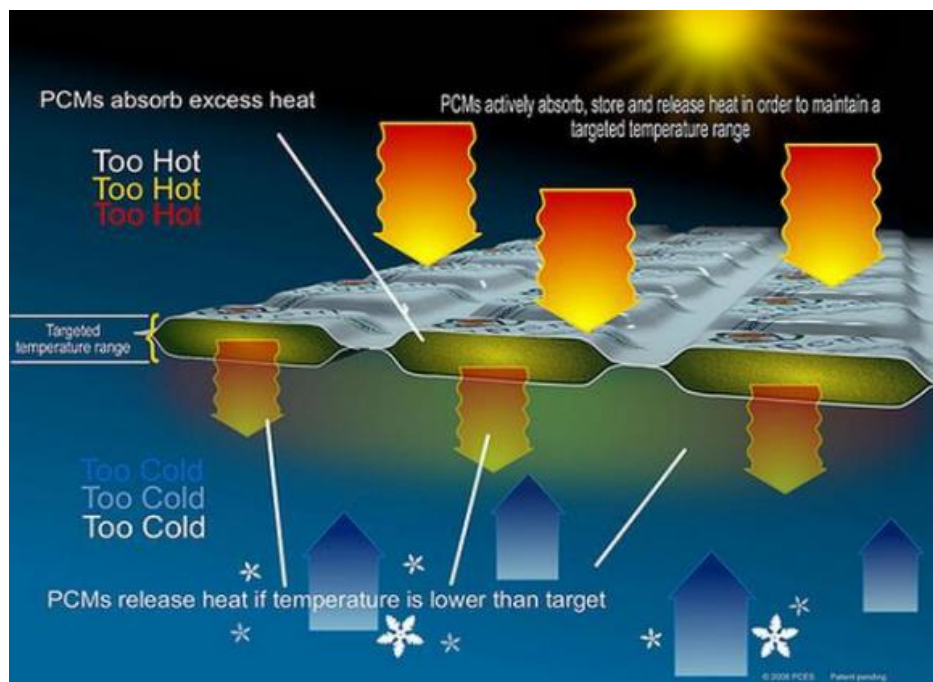


Figura 2.5 – Princípio operativo do BioPCM (phasechangeenergy.com).

Para além de conter o PCM líquido de forma a impedir a alteração da sua composição com o meio ambiente, o macro encapsulamento também melhora a compatibilidade do material com a envolvente, através da construção de uma barreira, melhorando o seu manuseamento na produção e reduz mudanças de volume externas (Cabeza et al., 2011).

O microencapsulamento consiste em juntar o PCM numa cápsula de polímero microscópico. Especial atenção deve ser tomada na escolha do material da cápsula para evitar reacções químicas entre as cápsulas e o material de construção (Kuznik et al., 2011).

O micro encapsulamento tem como vantagens: melhorar a transferência de calor para o meio circundante devido a sua grande superfície em relação ao volume e melhorar a estabilidade cíclica uma vez que a separação de fases é restrita a distâncias microscópicas (Cabeza et al., 2011).

Em suma, o encapsulamento ou contenção de um PCM deve

- satisfazer as exigências de resistência, flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica;
- actuar como uma barreira para proteger o PCM da interacção prejudicial com o meio ambiente;
- fornecer superfície suficiente para a transferência de calor;
- fornecer estabilidade estrutural e de fácil manuseio;
- "proporcionar grande área de transferência de calor, reduzindo a reactividade dos PCMs para o ambiente externo e controlar as alterações no armazenamento dos materiais à medida que a mudança de fase ocorre "(Farid et al., 2004, Regin et al., 2008)

---

## *Capítulo 3*

### *Aplicações dos PCMs*

## Capítulo 3. Aplicações dos PCMs

### 3.1 Introdução

As áreas de maior pesquisa de PCM têm sido o seu uso como reguladores de temperatura em aparelhos de alta potência electrónica, telemóveis e veículos espaciais (Pal and Joshi, 1995, Gurrum et al., 2002), armazenamento de energia térmica (Agyenim et al., 2010, Sharma et al., 2009) conservação biológica e conservação de alimentos (Mcdermott, 1997, Drage, 2009, Wyatt, 1991), mudança ou redução do pico de energia eléctrica (Halford and Boehm, 2005, Enibe, 2003, Fath, 1998, Fath, 1995), terapias médicas (Salyer, 1996, Junghanss et al., 2009), tecidos para o conforto humano (Sánchez et al., 2010, Mondal, 2008), tecidos de construção que oferecem arrefecimento passivo dos edifícios (Huang et al., 2006, Zalba et al., 2004) e gestão térmica de motores e conversores de energia em veículos eléctricos (Jackson III, 2002). As áreas em que os PCMs são aplicadas atualmente estão listadas na Tabela 3.1 (Hasan et al., 2010).

**Tabela 3.1 - Aplicações de PCMs**

<b>Aplicações</b>	<b>Referências</b>
Sistemas de armazenamento de energia térmica para armazenamento de energia solar e aproveitamento	(Fath, 1998, Pillai and Brinkworth, 1976, Zalba et al., 2003, Kenisarin and Mahkamov, 2007, Regin et al., 2008, Sharma et al., 2009, Agyenim et al., 2010)
Proteção térmica de dispositivos electrónicos, chips de computador, veículos espaciais, poder eletrónico e de embalagens	(Fok et al., 2010, Kandasamy et al., 2008, Wang et al., 2007, Wang et al., 2008, Tan and Tso, 2004)
Regulação térmica de um edifício de células fotovoltaicas integradas	(Huang et al., 2004, Huang et al., 2006)
Refrigeração passiva de um edifício pelo armazenamento de calor em material de construção para conforto térmico e aparelhos eléctricos em edifícios	(Huang et al., 2006, Kenisarin, 2010, Zhou et al., 2009, Pasupathy et al., 2008a, Zalba et al., 2004, Hariri and Ward, 1988)
Arrefecimento durante o pico de cargas para reduzir a potência instalada pelo pico de corte.	(Halford and Boehm, 2005, Enibe, 2003, Fath, 1998, Fath, 1995)

Aquecimento água quente sanitária, usando cargas de pico.	
Armazenamento de energia solar, a altas temperaturas em usinas de energia solar.	(Gil et al., 2010, Michels and Pitz-Paal, 2007, Hoshi et al., 2005, Kenisarin, 2010)
Proteção térmica, preservação e transporte de itens alimentares.	(Mcdermott, 1997, Drage, 2009, Wyatt, 1991)
Encapsulamento em tecido têxtil para manter conforto térmico no homem.	(Sánchez et al., 2010, Mondal, 2008)
Aplicações médicas em transporte de sangue a uma temperatura controlada, mesas de operação, terapias quente-frio ( <i>hot-cold</i> )	(Salyer, 1996, Junghanss et al., 2009)
Arrefecimento do motor (eléctrico e de combustão)  Conforto térmico em veículos	(Jackson III, 2002)

### 3.2 Aplicações dos PCMs em edifícios

A escolha de PCMs para satisfazer as especificações de um edifício residencial tem recebido uma menor atenção, no entanto é um campo onde estes materiais são mais utilizados. Os PCMs podem ser incorporados em edifícios de várias formas para aumentar a capacidade de armazenamento de calor dos materiais. Com a implementação de PCMs em placas de gesso, painel *sandwich*, materiais de cobertura de betão ou de outra parede, o armazenamento de energia térmica torna-se parte da estrutura do edifício, o que é útil, mesmo para edifícios “leves”. Devido a sua baixa massa térmica, tende a existir uma flutuação de temperatura, o que resulta num elevado aquecimento e arrefecimento. Eles podem captar a energia solar diretamente ou energia térmica por convecção natural e armazená-los como calor latente. A aplicação deste tipo de material num edifício deste tipo irá ajudar a suavizar as variações de temperatura (Jeon et al., 2012, Farid et al., 2004).

Esta capacidade do PCM para armazenar a energia térmica pode ser usada de várias formas, para tornar o sistema mais eficiente e mais barato.

### **3.3 Classificação das aplicações dos PCMs em edifícios**

Quando se fala na classificação das aplicações dos PCMs em edifícios deve-se ter em conta dois pontos principais:

- A forma como estes são incorporados nos edifícios;
- Os factores relacionados com a sua utilização.

O primeiro ponto está relacionado com a possibilidade do PCM ser incorporado num sistema passivo ou activo. As aplicações passivas são aquelas que não usam dispositivos mecânicos ao contrário das aplicações activas, em que a carga/descarga de energia térmica é adquirida com o auxílio de um equipamento mecânico. Os sistemas passivos podem tirar partido dos ganhos diretos ou indiretos de energia solar, bem como os ganhos térmicos internos (Zhu et al., 2009).

O segundo ponto está relacionado com os factores que afectam o sucesso da sua utilização, tais como:

- O clima,
- A concepção de construção e a sua orientação,
- A localização do PCM;
- Tipo e quantidade de material utilizado;
- A temperatura de transição, o método de encapsulamento,
- A forma como o PCM é carregado / descarregado,
- Estratégias complementares utilizados;
- Design de equipamentos e selecção;
- Sistema de controle e algoritmos operacionais;
- Política de taxa de utilidade (Zhu et al., 2009).

### **3.4 Aplicações passivas de PCM**

As três principais áreas que os PCMs foram introduzidos no processo de construção são:

- PCM em paredes - gesso e impregnação de betão (com macro e micro técnicas de encapsulamento),
- PCM em outros componentes que não paredes - incluindo persianas e vidros duplos,



- PCM em unidades de armazenamento de calor e frio - por exemplo, sistemas de aquecimento de pisos, sistemas de ventilação noturna.

Os primeiros dois pontos são sistemas passivos, onde o calor e o frio armazenado é automaticamente libertado quando a temperatura interior ou exterior sobe ou desce determinada temperatura. O terceiro ponto é um sistema ativo, onde o calor ou frio é armazenado em condições de confinamento termicamente separado do edifício por isolamento (Tyagi and Buddhi, 2007).

### 3.4.1 Parede trombe

A parede de Trombe é um exemplo primordial de uma abordagem de ganho indireto. Os princípios em que este sistema se baseia passam pela construção de uma parede com incorporação de PCM na fachada sul de um edifício, a parede é aquecida durante o dia pela radiação solar incidente, entrando o PCM em fusão. À noite, quando o PCM solidifica, vai libertar o calor armazenado para aquecer o edifício. Os materiais mudança de fase têm sido usados para substituir a alvenaria numa parede de Trombe. Têm sido realizados testes experimentais e teóricos de forma a investigar a viabilidade de utilizar PCMs como uma parede Trombe (Swet, 1980, Ghoneim et al., 1991). Para uma dada quantidade de armazenamento de calor, as unidades de mudança de fase necessitam de menos espaço do que as paredes de água ou paredes Trombe em massa e são mais leves em peso. Nas paredes de trombe com PCM já testadas foram utilizados sal e hidratos de hidrocarbonetos.

Na Figura 3.1 encontra-se um exemplo do funcionamento de uma parede de trombe em consoante a estação do ano.



Figura 3.1– Funcionamento de uma parede de trombe consoante a estação do ano (Swet, 1980)

Telkes (Telkes, 1975) propôs a inclusão de PCMs em paredes, divisórias, tetos e pisos para servir como reguladores de temperatura. Askew (Askew, 1978) utilizou um painel colector feito de uma placa fina de cera de parafina e montado atrás do vidro duplo do edifício e descobriu que a eficiência térmica é comparável com a dos colectores planos convencionais. Farouk e Gucer (Farouk and Gucer, 1979) estudaram a utilidade da parede PCM instalado num edifício para aquecimento doméstico noturno usando uma mistura de sal e SUNOCO P-116 (cera). Observou-se que, se a parede de PCM for concebida adequadamente, elimina algumas das características indesejáveis das paredes de alvenaria.

Bourdeau (Bourdeau, 1980) testou duas paredes de armazenamento usando hexa-hidrato de cloreto de cálcio (ponto de fusão 29 °C) como material de mudança de fase. Ele concluiu que 8,1 centímetros de parede com PCM têm um desempenho térmico ligeiramente superior ao de uma parede de alvenaria de 40 cm de espessura.

Stritih e Novak (Stritih and Novak, 1996) apresentaram uma parede solar para aquecimento do edifício, que absorve a energia solar através da cera de parafina (ponto de fusão, 25-30 °C). A eficiência da absorção alcançou os 79%. O resultado da simulação mostrou que o painel dita a quantidade de calor armazenado como sensível ou latente e que o ponto de fusão do PCM tem uma influência sobre a temperatura do ar de saída.

### **3.4.2 Envidraçados**

Ismail e Henríquez (Ismail and Henríquez, 2001) propõem um sistema constituído por um vidro duplo com caixa-de-ar e enchimento em PCM, associado a uma bomba e a um tanque de PCM. O PCM, mantido no tanque em estado líquido, é bombeado e solidifica no espaço entre os vidros formando uma janela de vidro duplo com PCM em vez de ar no espaço entre os vidros, impedindo o calor de se dissipar através da janela e mantendo a temperatura interior. Quando o espaço entre os vidros é completamente cheio de PCM atinge-se uma redução total de 55% no consumo de energia.

Weinlader (Weinlader et al., 2005) também realizou experiências de modo a analisar a influência de um painel de PCM aplicado no interior de envidraçados duplos de acordo com a Figura 3.2, tendo registado transmitâncias na ordem de 40%. Com os ganhos solares a diminuírem em cerca de 50%, a incorporação de PCM resultou numa redução de 25% nas perdas térmicas em fachadas sem proteção solar.

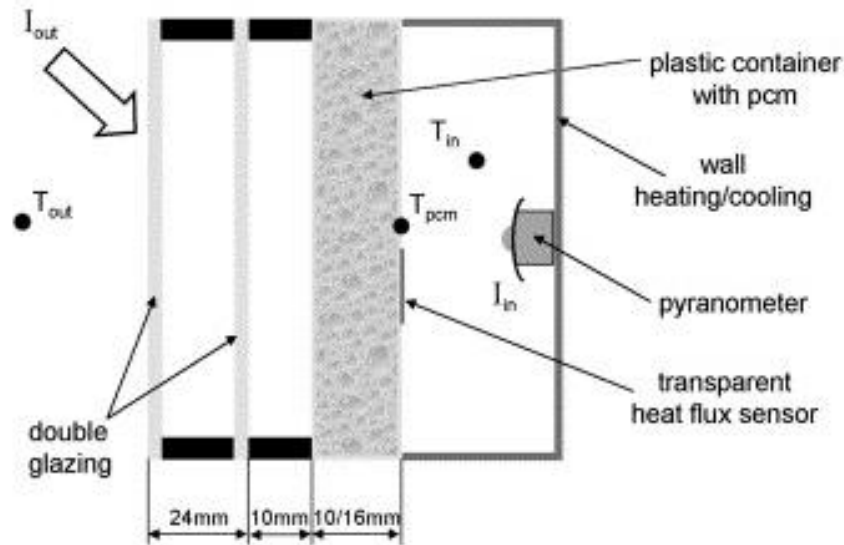


Figura 3.2 Set-up experimental (Weinländer et al., 2005).

### 3.4.3 Utilização de PCM em proteção solar

Neste conceito, o obturador contendo PCM é colocado fora das áreas de janela. Durante o dia eles são abertos para o exterior e o lado exterior é exposto à radiação solar, o calor é absorvido e derrete o PCM. À noite, fecha-se o obturador e deslizam-se as janelas, irradiando o calor do PCM para os compartimentos. Buddhi e outros estudaram o desempenho térmico de uma célula de ensaio, com e sem material de mudança de fase, tendo concluído que a capacidade de armazenar calor da célula devido à presença de PCM aumenta até 4 °C para 4-5 horas. (Tyagi et al., 2012)

### 3.4.4 Betão

As primeiras experiências de aplicação de PCMs em betão tinham como objetivo o aumento da capacidade de armazenamento de energia do betão para utilização em edifícios residências e comerciais, através da incorporação de PCMs em temperaturas de transição, próximo das temperaturas de conforto.

Em (Cabeza et al., 2007) é estudado como a integração de PCM em materiais de construção, neste caso cubículos de betão, poderia afetar a eficiência no armazenamento de energia térmica de um edifício. O estudo compreendia a comparação de um cubículo de betão sem PCM e outro com PCM. Com este estudo conclui-se que o cubículo com PCM apresenta uma inércia térmica maior e também uma temperatura interior menor.

Shi et al. (Shi et al., 2010) estudaram experimentalmente o uso do PCM na forma de parafina no betão para evitar fissuras de origem térmica. A resistência à compressão e à permeabilidade do betão com PCM foram testados e a estrutura de poros microscópicos também foi investigada. A porosidade total da argamassa com PCM não sofreu grandes alterações comparativamente com o de argamassa comum. No entanto, o diâmetro dos poros aumentou e a temperatura máxima da argamassa também diminuiu pela adição de PCM. Além disso a taxa de processo de aumento da temperatura e do processo de queda de temperatura foram reduzidos, podendo-se evitar com maior probabilidade a formação de fissuras devido à oscilação de temperatura no betão.

Em (Baetens et al., 2010) é feita uma comparação entre placas de gesso e betão com incorporação de PCM e é possível concluir que o betão consegue obter uma capacidade térmica 10 vezes superior ao gesso, no entanto é necessário avaliar se será economicamente viável, devido ao alto custo de aplicação de PCM.

#### **3.4.5 Painéis de gesso cartonado**

Os painéis de gesso são capazes de captar uma grande proporção da radiação solar incidente sobre a superfície do edifício. São baratos e utilizados numa grande variedade de aplicações, mas poucos estudos analíticos têm sido realizados sobre PCM com materiais de gesso e não forneceram uma visão suficiente para o comportamento termodinâmico dos produtos disponíveis. Salyer e Sircar (Salyer and Sircar, 1990) utilizaram cera de parafina impregnada no gesso para aplicação passiva solar. Shapiro et al. (Shapiro et al., 1987) investigou métodos para impregnar gesso e outros materiais com o PCM.

Kissock et al. (Kissock et al., 1998) apresentou os resultados de um estudo experimental sobre o desempenho térmico de painéis de gesso embebidos a 30wt% com parafina comercial PCM (K18), em estruturas simples. Os resultados indicaram que a temperatura de pico na célula de teste de mudança de fase foi de 10°C a menos de que na célula de ensaio de controlo durante os dias de sol.

### 3.5 Aplicações ativas de PCM

#### 3.5.1 Aquecimento de piso

A maioria dos sistemas ativos de pavimentos podem ser usados para armazenamento de energia térmica nos edifícios. Farid e Chen (Farid and Chen, 1999) propuseram um sistema eléctrico sob piso de aquecimento com cera de parafina (ponto de fusão de 40°C). Colocaram uma camada de 30 mm de PCM entre a superfície de aquecimento e os ladrilhos do piso. Através de uma simulação descobriram que a produção de calor do piso podia ser significativamente aumentada de 30 para 75 W/m<sup>2</sup>. Também Li et al. (Lin et al., 2005) realizou um estudo de um piso com um sistema de aquecimento eléctrico e placas de PCM. Neste estudo foi usado uma parafina 75wt% como PCM disperso e 25wt% como material de suporte. As conclusões foram as seguintes: o sistema aumentou a temperatura interior, sem aumentar a diferença de temperatura, a temperatura das placas de PCM foi mantida durante um longo período após os aquecedores pararem de funcionar, o aquecimento foi confortável e energeticamente eficiente.

#### 3.5.2 Ventilação noturna

O conceito de *free-cooling*, traduzido como arrefecimento livre, foi desenvolvido para aplicações de ar condicionado, consiste numa técnica que explora a existência de diferenças de temperatura entre ambientes para a produção de arrefecimento. Neste caso o ar fresco noturno é recolhido e libertado durante o dia nas horas de maior calor. (Bruno and Saman, 2002, Vakilaltojjar and Saman, 2001, Zalba, 2002)

Em (Vakilaltojjar and Saman, 2001) foi desenvolvido um modelo para analisar o sistema de armazenamento de mudança de fase para aplicações de ar condicionado. Concluíram que um melhor desempenho térmico seria possível com menores espaços de ar e placas de pcm mais finas. (Kang et al., 2003) desenvolveu um novo sistema de *free-cooling*, como é ilustrado na Figura 3.3.

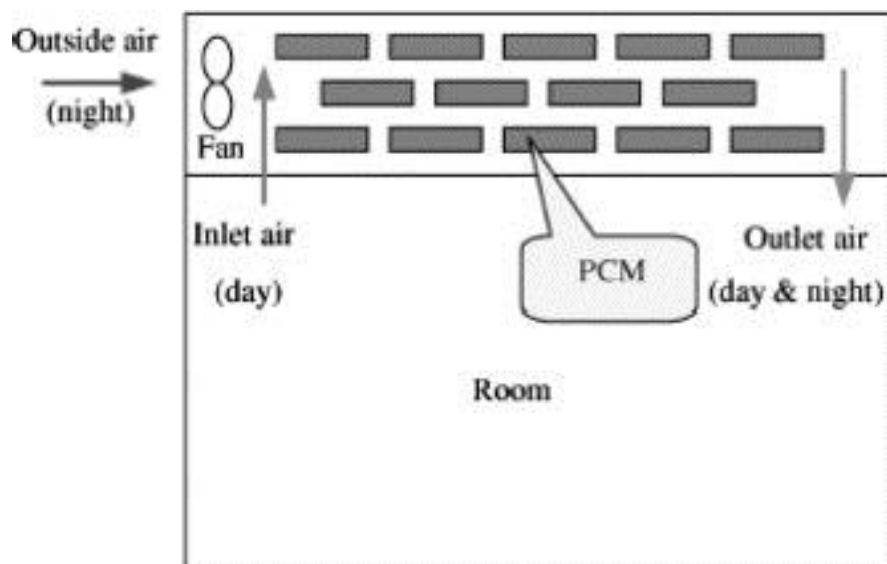


Figura 3.3 Sistema *free-cooling* desenvolvido por Kang (Kang et al., 2003).

Este sistema permitiu utilizar o conceito de *free-cooling* de uma forma mais eficaz, uma vez que permite aumentar a área de transferência de calor como também melhorar a eficiência na utilização da energia térmica armazenada.

---

## *Capítulo 4*

### *Simulação dinâmica*

## **Capítulo 4. Simulação dinâmica**

### **4.1 Introdução**

Dada a recente legislação e a atual problemática da utilização de energia de origem ambiental, os aspetos relacionados com a otimização energética são primordiais no projeto de um edifício. Assim sendo, a utilização de programas de simulação são cada vez mais importantes para avaliar o comportamento térmico e o conforto térmico dos edifícios e são decisivos em termos de poupança de energia, redução de custos, diminuição da taxa de erros e aumento de qualidade. Na fase inicial de um projeto, para uma maior eficiência na conceção de um edifício, deve-se usar esta ferramenta de simulação como forma de antecipação/previsão do comportamento térmico do edifício, permitindo igualmente a sua verificação regulamentar. Após esta introdução, faz-se uma descrição do software que foi utilizado ao longo deste trabalho, bem como algumas das suas funcionalidades.

### **4.2 Procedimento da simulação dinâmica**

A climatização permite-nos alcançar as condições térmicas interiores desejadas para se promover um maior conforto térmico para os seus ocupantes. Para além desta, é necessário também garantir a qualidade do ar, recorrendo à ventilação e à entrada de ar novo por infiltrações. A climatização está diretamente ligada à transmissão de calor e massa que ocorre entre um sistema termodinâmico e a sua envolvente. Este sistema sofre a ação de três tipos de cargas térmicas.

- Internas – geradas pela taxa de ocupação, pela iluminação e pelo funcionamento de diversos equipamentos;
- Externas – provocadas pelo clima, através da temperatura, da radiação solar, do vento e da humidade que promovem trocas através da envolvente;
- Infiltrações e ar novo – provocadas pela infiltração e renovação do ar interior.

Todas estas cargas térmicas devem ser contabilizadas, pois são mecanismos de transferência de energia e irão influenciar a potência de aquecimento e de arrefecimento assim como os consumos de energia necessários ao edifício.

A transmissão de calor pode ocorrer segundo três mecanismos:



- Condução - transporte de energia através de um meio, sólido, líquido ou gasoso;
- Convecção - transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido em movimento, líquido ou gasoso, de forma forçada ou natural;
- Radiação – transporte de energia através de ondas eletromagnéticas, realizado de forma independente em relação ao meio em que ocorre o transporte.

É necessário o entendimento dos mecanismos físicos que permitem a transmissão de calor, de modo a poder quantificar a quantidade de energia transferida por unidade de tempo.

Para manter uma habitação com a adequada temperatura de conforto é necessário contrariar estes mecanismos, seja através de isolamento ou equipamentos de climatização corretamente dimensionados.

O cálculo das cargas térmicas e do desempenho dos sistemas de climatização pode ser feito por diversos programas de cálculo, devidamente reconhecidos e em conformidade com a legislação. Para o presente trabalho foi escolhido o software EnergyPlus com interface gráfica DesignBuilder.

### 4.3 EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um programa de simulação de energia em edifícios, utilizado no mundo inteiro, integrado com os seus sistemas. O funcionamento do programa *Energyplus* baseia-se em efetuar simulações do balanço térmico e de massa para as zonas estabelecidas, sendo possível definir em cada um destes todos os parâmetros pretendidos. A Tabela 4.1 apresenta os dados de entrada (inputs) e os dados de saída (outputs) de uma simulação em *EnergyPlus*.

**Tabela 4.1 - Inputs e Outputs do Energyplus**

<b>Inputs</b>	<b>Outputs</b>
Localização	Temperaturas interiores
Dados climáticos	Temperatura exterior
Geometria e orientação	Fluxos de calor através da envolvente
Definição das zonas	Necessidades de consumo de aquecimento

Definição das envolventes	Necessidades de consumo de arrefecimento
Ganhos internos	
Dados operativos	
Sistemas AVAC	
Métodos de cálculo	
Período de simulação	

De uma forma geral, é necessário introduzir no programa todos os detalhes relativos ao modelo de simulação, desde propriedades dos materiais, geometria, orientação, caracterização de envolventes, clima, entre outros. Para obter os outputs, o programa calcula a energia necessária para manter as condições interiores selecionadas pelo utilizador, baseando-se nos dados operativos definidos pelo mesmo.

#### 4.4 DesignBuilder

Este simulador foi o primeiro interface gráfico para o programa de simulação térmica e dinâmica *EnergyPlus* ([www.designbuilder.co.uk/](http://www.designbuilder.co.uk/)). É um programa cuja interface é intuitiva e fácil de trabalhar e por essa razão tem sido uma ferramenta bastante utilizada entre projetistas e peritos, uma vez que permite construir um modelo de um edifício, caracterizá-lo e possibilita simular várias tentativas e definir estratégias de forma a melhorar o comportamento energético de um edifício sem que seja necessário que haja uma intervenção direta no edifício. Oferece uma quantidade imensa de bibliotecas com pré-definições que facilitam a implementação de dados no programa. Estes vão desde dados exteriores ao edifício como os dados climáticos até aos horários de utilização de diversos tipos de zona de diversos tipos de edifícios.

##### 4.4.1 Interface

O programa *DesignBuilder* oferece uma plataforma de modelação de edifícios em 3D através da criação de “*blocks*”. Não existe limitações em termos de geometria, podendo esticar, cortar ou até rodar os elementos de forma a obter a geometria que pretendemos. Este programa dá-nos liberdade para fazer alterações a um nível mais geral, o edifício,

como também a um nível mais detalhado de um bloco, de uma zona ou ainda dos componentes de cada zona, como paredes, tetos, janelas e pavimentos.

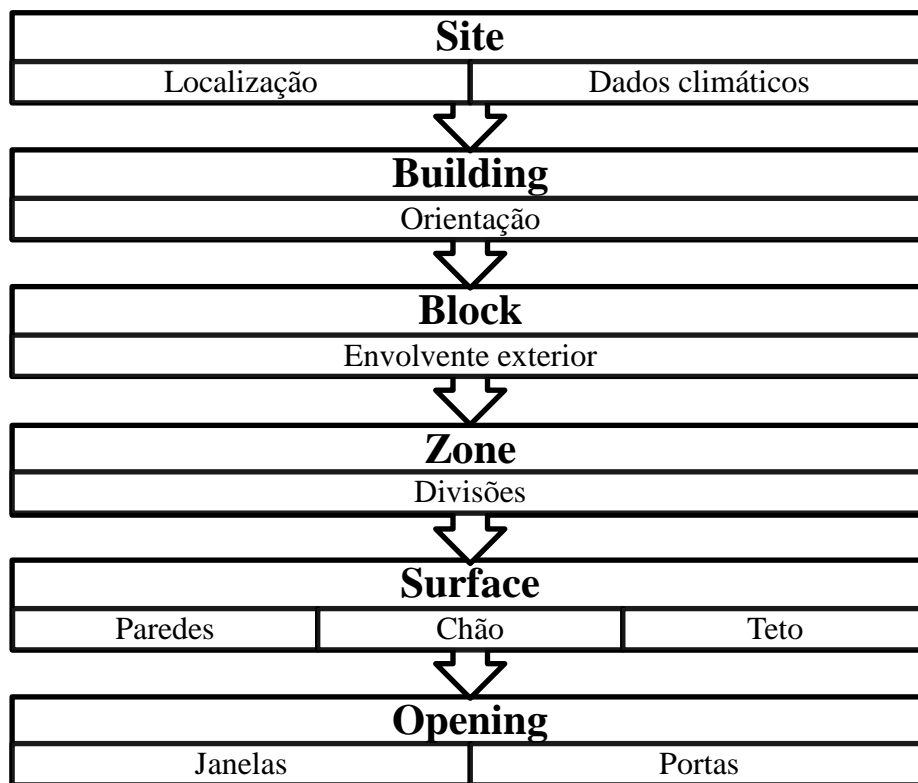


Figura 4.1 – Descrição da hierarquia definida no programa DesignBuilder.

É na caracterização do edifício que o programa se destaca, em que a implementação de dados do edifício em geral ou de uma zona é feita através de cinco separadores:

- *Activity* - dados referentes ao tipo de atividade realizada numa determinada zona. Exemplo: horário e densidade de ocupação, densidade de iluminação, taxa de metabolismo, consumo de água quente sanitária, volume de ar novo insuflado, etc.;
- *Construction* - zona onde é definida a composição dos elementos de construção. O programa possibilita a escolha de um template com todos os elementos construtivos já definidos, de uma lista de ficheiros de dados.
- *Openings* - dados referentes a aberturas no edifício. Exemplo: janelas, cortinados, portas, tipo de vidro, etc.;
- *Lighting* - dados referentes à iluminação. Exemplos: tipo de iluminação, horário, etc.;

- HVAC - área particularmente importante na caracterização dos sistemas de ar condicionado, águas, eletricidade e gás. É nesta zona que se regula o funcionamento de ventilação mecânica, sistema de aquecimento, sistema de arrefecimento, controlo de humidade e ventilação natural.

Os dados de simulação podem ser disponibilizados em períodos anuais, mensais, diários, horários ou sub-horários, tais como o consumo energético discriminado por fins (aquecimento, arrefecimento ambiente, ventilação, iluminação, equipamentos etc.), e por formas de energia utilizadas no edifício (eletricidade, gás natural, propano ou butano, biomassa, outras), temperaturas do ar interior, média radiante e operacional, humidade relativa, índices de conforto, incluindo curvas de distribuição de temperatura, dados climáticos do local, transmissão de calor através da envolvente do edifício (paredes, coberturas, infiltração, ventilação), cargas de aquecimento e climatização, produção de CO<sub>2</sub>. No final os resultados são apresentados na forma de gráficos ou tabelas, como ilustrado na Figura 4.2, sendo possível definir o tipo de informação que se obtém, os intervalos de tempo entre cálculos e o período de tempo da simulação.

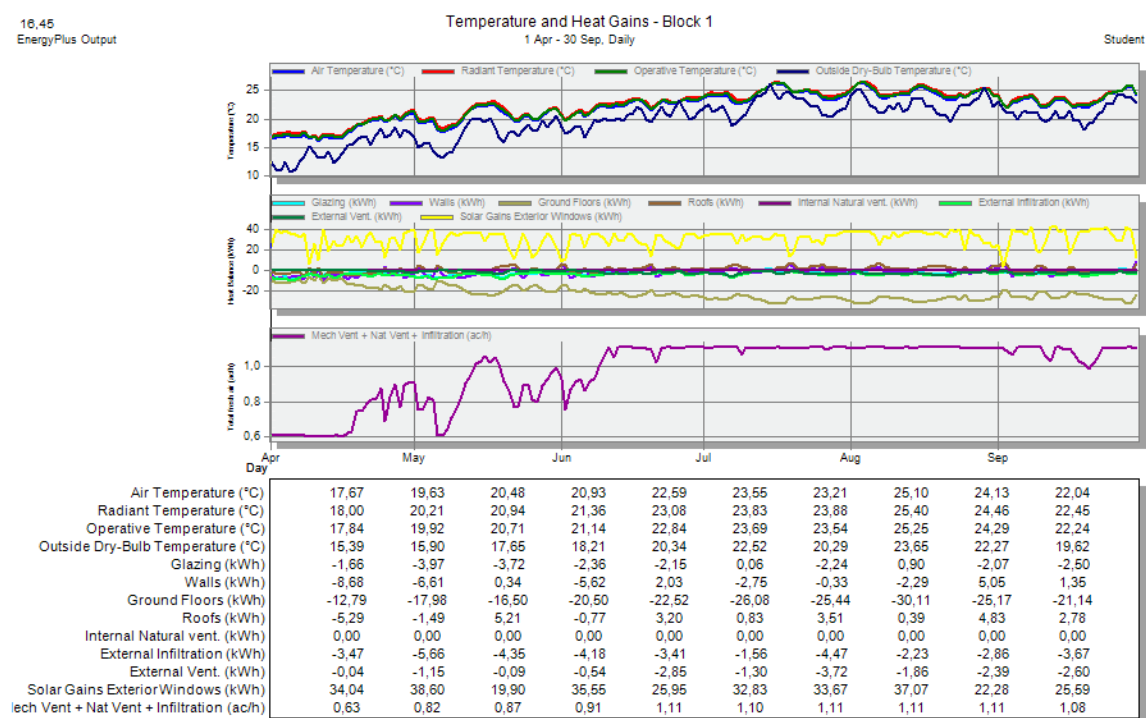


Figura 4.2 – Pormenor do resultado final, apresentado na forma de gráficos e tabelas.

---

# *Capítulo 5*

## *Caso de estudo*

## **Capítulo 5. Caso de estudo**

### **5.1 Procedimento**

O presente estudo foi dividido em fases cumulativas. Numa primeira fase procedeu-se a uma análise simplificada para uma célula com geometria simples e sem compartimentação interior, que será apresentada posteriormente. Foi feita uma análise comparativa entre os diferentes tipos de PCM de forma a identificar qual o tipo, quantidade e a posição de aplicação de PCM mais indicado para cada clima e zona térmica em análise.

De salientar que nesta primeira fase não foram considerados sistemas de climatização, nem ganhos internos devidos a ocupação, equipamentos elétricos e iluminação. Optou-se por uma estrutura totalmente passiva de forma a se fazer uma análise comparativa mais efetiva quanto às diferentes formas de aplicação dos PCM. Também se deve considerar que para uma melhor análise foram considerados os valores de referência, respeitando o REH, nomeadamente os coeficientes de transmissão térmica de referência.

Foi considerado que o edifício é ventilado em permanência por um caudal mínimo de ar, ventilação natural, de forma a garantir a qualidade mínima do ar interior e assim otimizar o conforto ambiental.

Foi também considerado a existência de ventilação natural noturna, com o objetivo de arrefecer o ambiente interior no período noturno, de forma gratuita, durante a estação de arrefecimento. Desta forma irá permitir ao PCM libertar mais facilmente a energia absorvida durante o período do dia.

Nesta fase foi considerado, para efeito de análise, uma renovação do ar por hora igual a 0.6rph

Numa segunda fase, mantendo a mesma estrutura da célula de teste, esta foi dividida em 5 zonas, aproximando da organização de uma habitação unifamiliar. Foi então considerado um sistema de climatização com 100% de eficiência ( $COP=1$ ) e retirado a necessidade energética para manter os níveis de conforto na célula, entre 20°C e 25°C. Este sistema é definido para atuar nos períodos de maior ocupação, das 18h às 8h, sendo que irá aquecer quando a temperatura interior for inferior a 20°C e arrefecer quando esta for superior a 25°C.

Numa terceira fase é definido um estudo de sensibilidade para uma das regiões de Portugal, neste caso foi escolhido Lisboa. Simulou-se a célula de teste com e sem PCM, variando alguns parâmetros, como as renovações horária, introdução de proteções solares e a variação da área de envidraçado. De salientar que nesta fase apenas se considerou ventilação natural, constante durante todo o dia e ventilação noturna, que é ativada apenas durante a noite.

Numa última fase, ainda para a região escolhida no estudo de sensibilidade, é estudado a célula de teste por zonas, tendo em conta as zonas térmicas do modelo mais desfavoráveis e considerado um sistema ativo, com ganhos internos da iluminação, equipamentos elétricos, bem como um sistema de climatização. O objetivo será encontrar a melhor solução.

## 5.2 Seleção das zonas

A localização de um edifício é muito importante em termos de necessidades térmica. O zonamento climático baseia-se na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos de Nível III (NUTS III), cuja composição é feita por municípios, detalhada na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 – NUTS III**

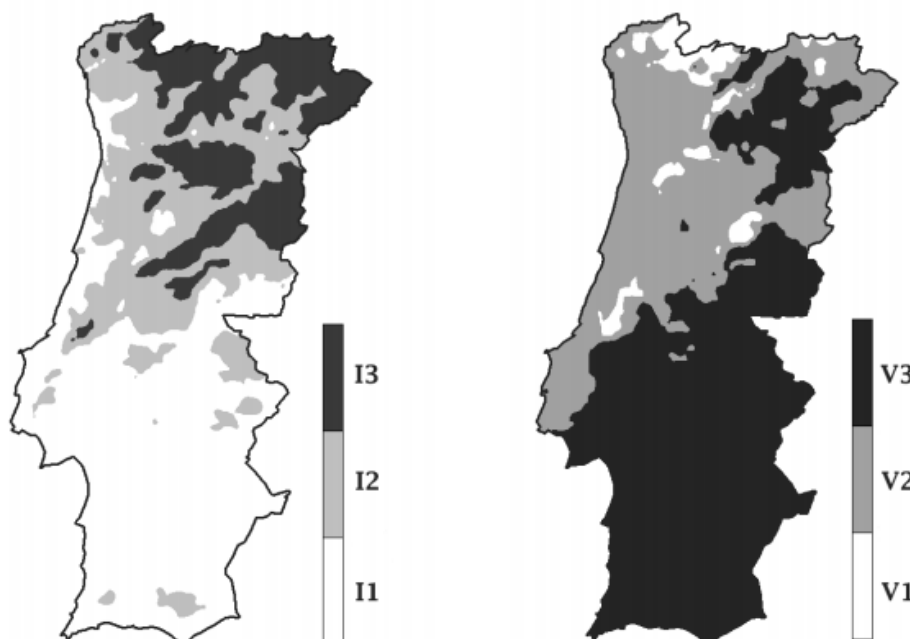
<b>NUTS III</b>	<b>Município</b>
Minho-Lima	Arcos de Valdevez, Caminha, Melgaço, Monção, Paredes de Coura, Ponte da Barca, Ponte de Lima, Valença, Viana do Castelo, Vila Nova de Cerveira
Alto Trás-os-Montes	Alfândega da Fé, Boticas, Bragança, Chaves, Macedo de Cavaleiros, Miranda do Douro, Mirandela, Mogadouro, Montalegre, Ribeira de Pena, Valpaços, Vila Flor, Vila Pouca de Aguiar, Vimioso, Vinhais
Cávado	Amares, Barcelos, Braga, Esposende, Terras de Bouro, Vila Verde
Ave	Cabeceiras de Basto, Fafe, Guimarães, Mondim de Basto, Póvoa de Lanhoso, Vieira do Minho, Vila Nova de Famalicão, Vizela
Grande Porto	Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Santo Tirso, Trofa, Valongo, Vila do Conde, Vila Nova de Gaia
Tâmega	Amarante, Baião, Castelo de Paiva, Celorico de Basto, Cinfães, Felgueiras, Lousada, Marco de Canaveses, Paços de Ferreira, Paredes, Penafiel, Resende
Douro	Alijó, Armamar, Carraceda de Ansiães, Freixo de Espada à Cinta, Lamego, Mesão Frio, Moimenta da Beira, Murça, Penedono, Peso da Régua, Sabrosa, Santa Marta de Penaguião, São João da Pesqueira, Sernancelhe, Tabuaço, Tarouca, Torre de Moncorvo, Vila Nova de Foz Coa, Vila Real

Entre Douro e Vouga	Arouca, Oliveira de Azeméis, Santa Maria da Feira, São João da Madeira, Vale de Cambra
Baixo Vouga	Águeda, Albergaria-a-Velha, Anadia, Aveiro, Estarreja, Ílhavo, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar, Sever do Vouga, Vagos
Baixo Mondego	Cantanhede, Coimbra, Condeixa-a-Nova, Figueira da Foz, Mealhada, Mira, Montemor-o-Velho, Mortágua, Penacova, Soure
Beira Interior Norte	Almeida, Celorico da Beira, Figueira de Castelo Rodrigo, Guarda, Manteigas, Mêda, Pinhel, Sabugal, Trancoso
Beira Interior Sul	Castelo Branco, Idanha-a-Nova, Penamacor, Vila Velha de Ródão
Cova da Beira	Belmonte, Covilhã, Fundão
Serra da Estrela	Fornos de Algodres, Gouveia, Seia
Dão - Lafões	Aguiar da Beira, Carregal do Sal, Castro Daire, Mangualde, Nelas, Oliveira de Frades, Penalva do Castelo, Santa Comba Dão, São Pedro do Sul, Sátão, Tondela, Vila Nova de Paiva, Viseu, Vouzela
Pinhal Interior Norte	Alvaiázere, Ansião, Arganil, Castanheira de Pera, Figueiró dos Vinhos, Góis, Lousã, Miranda do Corvo, Oliveira do Hospital, Pampilhosa da Serra, Pedrógão Grande, Penela, Tábua, Vila Nova de Poiares
Pinhal Interior Sul	Oleiros, Proença-a-Nova, Sertão, Vila de Rei
Pinhal Litoral	Batalha, Leiria, Marinha Grande, Pombal, Porto de Mós
Oeste	Alcobaca, Alenquer, Arruda dos Vinhos, Bombarral, Cadaval, Caldas da Rainha, Lourinhã, Nazaré, Óbidos, Peniche, Sobral de Monte Agraço, Torres Vedras
Médio Tejo	Abrantes, Alcanena, Constância, Entroncamento, Ferreira do Zêzere, Mação, Ourém, Sardoal, Tomar, Torres Novas, Vila Nova da Barquinha
Lezíria do Tejo	Almeirim, Alpiarça, Azambuja, Benavente, Cartaxo, Chamusca, Coruche, Golegã, Rio Maior, Salvaterra de Magos, Santarém
Grande Lisboa	Amadora, Cascais, Lisboa, Loures, Mafra, Odivelas, Oeiras, Sintra, Vila Franca de Xira
Península de Setúbal	Alcochete, Almada, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela, Seixal, Sesimbra, Setúbal
Alto Alentejo	Alter do Chão, Arronches, Avis, Campo Maior, Castelo de Vide, Crato, Elvas, Fronteira, Gavião, Marvão, Monforte, Mora, Nisa, Ponte de Sôr, Portalegre
Alentejo Central	Alandroal, Arraiolos, Borba, Estremoz, Évora, Montemor-o-Novo, Mourão, Portel, Redondo, Reguengos de Monsaraz, Sousel, Vendas Novas, Viana do Alentejo, Vila Viçosa



Alentejo Litoral	Alcácer do Sal, Grândola, Odemira, Santiago do Cacém, Sines
Baixo Alentejo	Aljustrel, Almodôvar, Alvitto, Barrancos, Beja, Castro Verde, Cuba, Ferreira do Alentejo, Mértola, Moura, Ourique, Serpa, Vidigueira
Algarve	Albufeira, Alcoutim, Aljezur, Castro Marim, Faro, Lagoa, Lagos, Loulé, Monchique, Olhão, Portimão, S. Brás de Alportel, Silves, Tavira, Vila do Bispo, Vila Real de Santo António
Região Autónoma dos Açores	Vila do Porto, Lagoa, Nordeste, Ponta Delgada, Povoação, Ribeira Grande, Vila Franca do Campo, Angra do Heroísmo, Praia da Vitória, Santa Cruz da Graciosa, Calheta, Velas, Lajes do Pico, Madalena, São Roque do Pico, Horta, Lajes das Flores, Santa Cruz das Flores, Vila do Corvo
Região Autónoma da Madeira	Calheta, Câmara de Lobos, Funchal, Machico, Ponta do Sol, Porto Moniz, Ribeira Brava, Santa Cruz, Santana, São Vicente, Porto Santo

Adicionalmente, são definidas três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3) para aplicação de requisitos de qualidade térmica da envolvente, como se pode verificar na Figura 5.1.



**Figura 5.1 – Zonas climáticas de Portugal para a estação de Inverno e Verão.**

Assim sendo, para efeitos de uma melhor análise comparativa, foram selecionadas 7 cidades de Portugal Continental com climas distintos. A Tabela 5.2 apresenta as 7 cidades escolhidas e as respetivas combinações de zonas climáticas com o número de graus-dias.

**Tabela 5.2 – Combinações de zonas climáticas com o número de graus-dias**

Combinações zonas climáticas	Número de Graus-Dias (°C.dias)	Cidade	NUTS III
$I_1V_2$	1071	Lisboa	Grande Lisboa
	1250	Porto	Grande Porto
$I_1V_3$	1150	Évora	Alentejo Central
$I_2V_2$	1702	Viseu	Dão-Lafões
	1337	Aveiro	Baixo Vouga
$I_2V_3$	1764	Lamego	Douro
$I_3V_2$	2015	Bragança	Alto Trás-os-Montes

De salientar que apesar de existirem zonas com as características de  $I_1V_1$ ,  $I_2V_1$ ,  $I_3V_1$  e  $I_3V_3$ , não correspondem a municípios, considerando os dados de referência. Dessa forma, não foram considerados.

### 5.2.1 Dados climáticos

Para que os resultados sejam o mais viáveis possíveis, quando se realiza uma simulação é necessário que esta seja efetuada com base num ficheiro climático, pois desta forma o programa consegue prever de uma forma real o comportamento do edifício, quer na estação de aquecimento quer na estação de arrefecimento. No nível “Site” introduzem-se dados relativos ao posicionamento e orientação geográfica do edifício. No separador *location* é introduzido o ficheiro climático correspondente ao concelho onde se encontra o edifício. Os ficheiros climáticos com toda a informação necessária para se proceder à simulação foi obtido através de um *software* que permitia descarregar o ficheiro *epw* (formato necessário para a leitura do programa) criado pelo LNEG (Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia),

### 5.3 Célula de teste

#### 5.3.1 Modelo geométrico

O desenho do edifício em si, define-se por uma estrutura quadrangular, sem grande complexidade em termos de geometria, este facto deve-se pela necessidade de tornar as simulações mais simples e precisas, tomando maior atenção à análise nos *inputs* mais importantes para uma correta simulação na combinação dos materiais mudança de fase com a envolvente da célula. Este apresenta uma área de  $100\text{ m}^2$ , com uma disposição de 10x10 metros e 3,5 metros de pé-direito. Possui uma porta, virada a Norte, 3 janelas do lado Oeste e 2 janelas do lado Este e Sul, sendo que as janelas de maior dimensão se encontram viradas a Sul. Na Figura 5.2 e Figura 5.3 encontra-se o modelo geométrico do caso de estudo com vista do alçado Norte e Sul.



**Figura 5.2 - Renderização do modelo geométrico criado no Designbuilder, vista do alçado Sul.**



**Figura 5.3 - Renderização do modelo geométrico criado no Designbuilder, vista do alçado Norte.**

### **5.3.2 Orientação da célula de teste**

É importante conhecer a trajetória solar ao longo do dia para as diferentes estações do ano no sentido de aproveitar da melhor forma os ganhos solares para o interior do edifício nos casos em que o contributo da radiação é favorável e restringir a sua entrada, nos casos em que o mesmo efeito é desfavorável. Este fator é bastante importante, no que respeita à definição da localização das fachadas envidraçadas num edifício, a sua dimensão e o tipo de vidro especificado. (Gonçalves and Graça, 2004)

Tendo em conta a eficiência energética, deve-se sempre optar pela orientação a Sul, uma vez que possibilita tanto ganhos solares, como o controlo do sobreaquecimento através de proteções exteriores.

A orientação a Sul permite diferenciar entre Verão e Inverno, uma vez que propicia maiores ganhos solares no Inverno, uma vez que o percurso solar se efetua para azimutes muito próximos do Sul geográfico e no Verão carrega menos ganhos solares, que é a situação ideal. Para fachadas orientadas a Este e a Oeste, o sol nasce e põe-se sempre baixo, variando apenas o local onde nasce e se põe. Assim, e porque os raios solares provenientes de Nascente e de Poente são mais intensos precisamente durante o Verão, quando não são desejados, é viável considerar a instalação de sistemas de sombreamento exterior de forma a controlar ou eliminar a entrada de radiação solar. A fachada orientada a Norte será a mais fria, uma vez que recebe pouca radiação solar direta tanto no Verão como no Inverno, no hemisfério Norte.

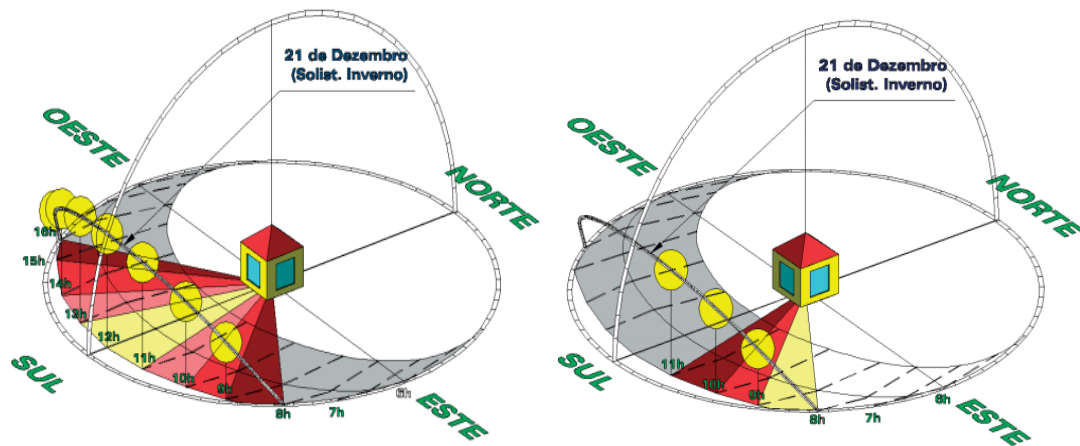


Figura 5.4 – Radiação Solar nas fachadas (Inverno) (Gonçalves and Graça, 2004).

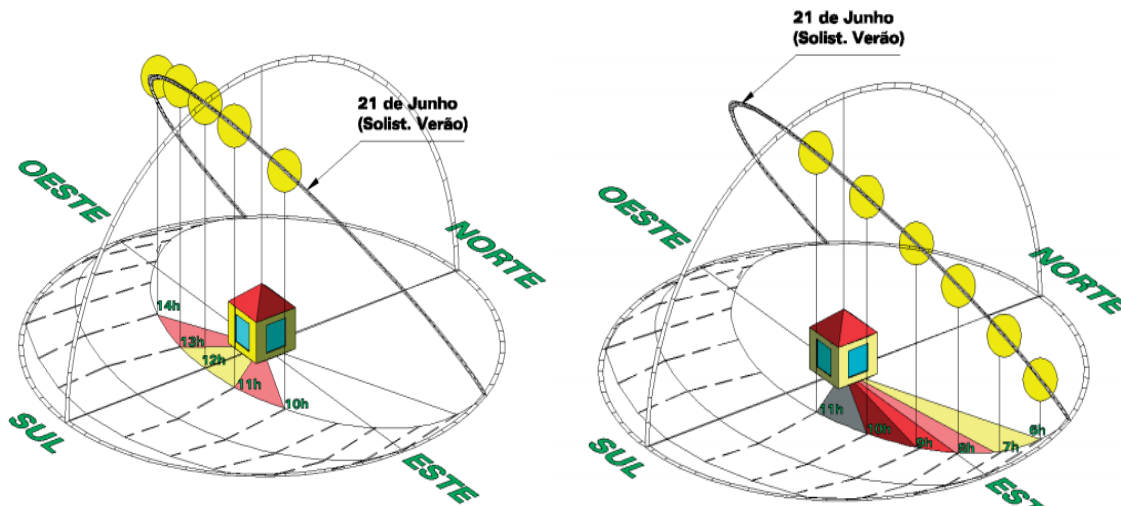


Figura 5.5 – Radiação Solar nas fachadas (Verão) (Gonçalves and Graça, 2004).

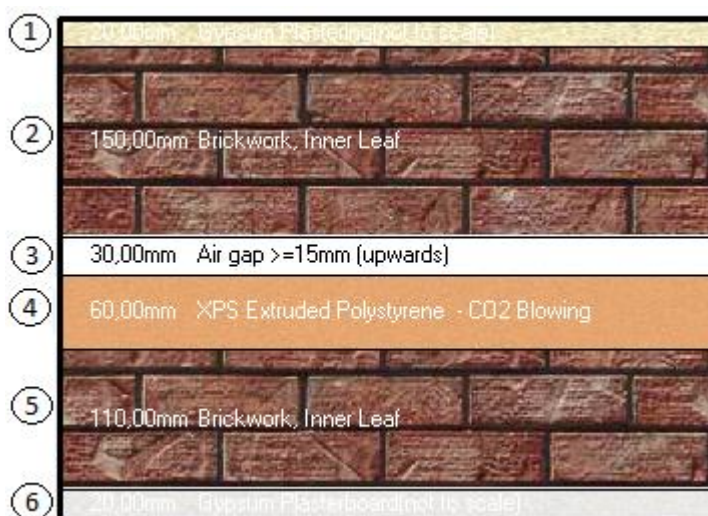
Desta forma, optou-se por na fachada a Norte não se colocar envidraçados e na fachada a Sul envidraçados de 30 % da área da parede de forma a promover os ganhos de radiação solar. Nos quadrantes a Nascente e Poente optou-se por envidraçados de 15% da área da parede.

### 5.3.3 Solução construtiva

#### 5.3.3.1 Materiais de construção

No separador *construction* são definidas as propriedades dos materiais de construção dos elementos opacos da célula, com os seus revestimentos, materiais e espessuras. O tipo de materiais usados na construção é um fator essencial no ambiente térmico do edifício, pois os diferentes tipos de materiais passíveis de serem usados diferem pelas suas características térmicas como condutividade, emissividade ou refletividade ou mesmo capacidade de isolamento. Optou-se por iniciar este estudo com uma célula de teste com uma construção semelhante à convencional Portuguesa, de forma a obter um comportamento térmico semelhante à realidade. Nesta fase não é apresentada a camada de PCM na célula de teste.

As paredes exteriores (Figura 5.6) são duplas, constituídas por tijolo furado de 15 cm, caixa-de-ar de 3 cm, isolamento de poliestireno extrudido (XPS) de 6 cm e tijolo furado de 11 cm, além de uma camada de 2 cm de reboco em ambas as faces.



Legenda:

- 1- Reboco tradicional - 2 cm
- 2- Tijolo cerâmico furado - 15 cm
- 3- Caixa-de-ar - 3 cm
- 4- Poliestireno extrudido (XPS) - 6 cm
- 5- Tijolo cerâmico furado - 11 cm
- 6- Gesso cartonado - 2 cm

**Figura 5.6 – Representação esquemática da parede dupla de alvenaria de tijolo de 15cm e 11cm com caixa-de-ar parcialmente preenchida com 6cm de poliestireno extrudido (XPS).**

As propriedades dos materiais que constituem as paredes da envolvente exterior são apresentadas na Tabela 5.3 e Tabela 5.4.

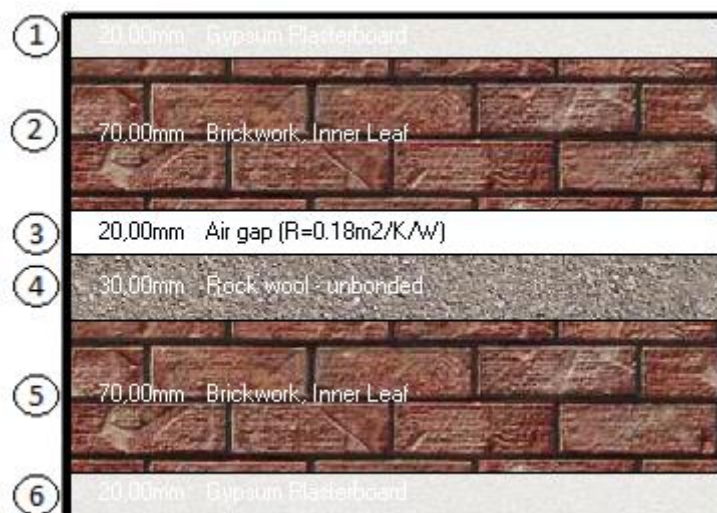
**Tabela 5.3 – Propriedades das camadas de constituição da parede dupla da envolvente exterior**

	Reboco tradicional	Tijolo 15	Tijolo 11	XPS	Gesso Cartonado
Densidade ( $kg/m^3$ )	1000	1700	1700	35	900
Espessura (m)	0,02	0,15	0,11	0,06	0,02
Condutividade térmica (W/m.K)	0,4	0,620	0,620	0,034	0,250
Calor específico ( $m^2 \cdot K/W$ )	1000	800	800	1400	2000

**Tabela 5.4 – Propriedades da caixa-de-ar da parede dupla da envolvente exterior**

Espessura (m)	0,03
Resistência térmica ( $m^2 \cdot K/W$ )	0,16

As paredes interiores (Figura 5.7) são duplas são constituídas por tijolo furado de 7 cm, caixa-de-ar de 2cm, parcialmente preenchida por 3 cm de lã de rocha e com uma camada de 2 cm de gesso cartonado em ambas as faces.



Legenda:

- 1- Gesso cartonado - 2 cm
- 2- Tijolo cerâmico furado - 7 cm
- 3- Caixa-de-ar - 2 cm
- 4- Lã de rocha - 3 cm
- 5- Tijolo cerâmico furado – 7 cm
- 6- Gesso cartonado – 2 cm

**Figura 5.7 – Representação esquemática da parede dupla de alvenaria de tijolo de 7 cm com caixa-de-ar parcialmente preenchida com 3cm de lã de rocha.**

As propriedades dos materiais que constituem a solução construtiva das paredes interiores são definidas na Tabela 5.5 e Tabela 5.6.

**Tabela 5.5 – Propriedades das camadas de constituição das paredes interiores**

	Reboco tradicional	Tijolo 7	Lã de rocha	XPS	Gesso Cartonado
Densidade ( $kg/m^3$ )	1000	1700	1700	35	900
Espessura (m)	0,02	0,15	0,11	0,06	0,02
Condutividade térmica (W/m.K)	0,4	0,620	0,620	0,034	0,250
Calor específico ( $m^2 \cdot K/W$ )	1000	800	800	1400	2000

**Tabela 5.6 - Propriedades da caixa-de-ar da parede dupla da envolvente interior**

Espessura (m)	0,03
Resistência térmica ( $m^2 \cdot K/W$ )	0,16

O pavimento térreo é constituído por uma laje de betão de 20 cm, uma camada de regularização de 5 cm, 3 cm de XPS, 2 cm de caixa-de-ar e o revestimento em madeira com 1 cm de espessura.



Legenda:

- 1- Piso de madeira - 1 cm
- 2- Camada de regularização - 5 cm
- 3- Poliestireno extrudado (XPS) - 3 cm
- 4- Caixa-de-ar - 2 cm
- 5- Laje de betão - 20 cm

**Figura 5.8 – Representação esquemática do pavimento térreo**

As propriedades dos materiais que constituem a solução construtiva do pavimento térreo são apresentadas na Tabela 5.7 e Tabela 5.8



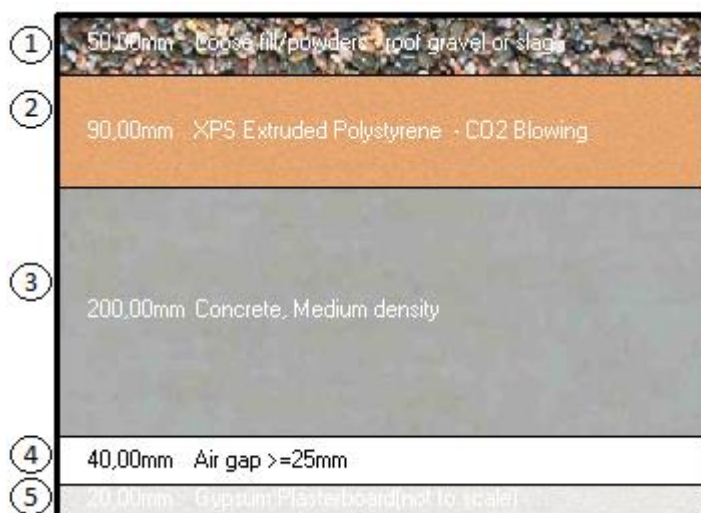
**Tabela 5.7 - Propriedades das camadas de constituição do pavimento térreo**

	Laje de betão	Camada de regularização	Piso de madeira	XPS	Gesso Cartonado
Densidade ( $kg/m^3$ )	1800	1200	650	35	900
Espessura (m)	0.2	0.05	0.01	0.03	0.02
Condutividade térmica (W/m.K)	1.35	0.410	0.140	0.034	0.250
Calor específico ( $m^2 \cdot K/W$ )	1000	840	1200	1400	2000

**Tabela 5.8 - Propriedades da caixa-de-ar do pavimento térreo**

Espessura (m)	0.02
Resistência térmica ( $m^2 \cdot K/W$ )	0.16

A cobertura é uma cobertura plana e é composta por uma laje de betão de 20 cm, 9cm de XPS, 5 cm de proteção pesada, 4 cm caixa-de-ar e uma camada de isolamento em XPS de 4 cm.



**Legenda:**

- 1- Proteção pesada - 5 cm
- 2- Poliestireno extrudado (XPS) - 9 cm
- 3- Laje de betão - 20 cm
- 4- Caixa-de-ar - 4 cm
- 5- Gesso cartonado - 2 cm

**Figura 5.9 – Representação esquemática da cobertura plana**

As propriedades dos materiais que constituem a solução construtiva da cobertura plana são apresentadas na Tabela 5.9 e Tabela 5.10

**Tabela 5.9 - Propriedades das camadas de constituição da cobertura plana**

	Proteção pesada	Laje de betão	XPS	Gesso Cartonado
Densidade ( $kg/m^3$ )	880	1800	35	900
Espessura (m)	0.05	0.2	0.03	0.02
Condutividade térmica (W/m.K)	1.44	1.35	0.034	0.250
Calor específico ( $m^2 \cdot K/W$ )	1680	1000	1400	2000

**Tabela 5.10 – Propriedades da caixa-de-ar da cobertura plana**

Espessura (m)	0.04
Resistência térmica ( $m^2 \cdot K/W$ )	0.18

Os valores das propriedades dos materiais usados nas diferentes soluções construtivas foram retirados fazendo uso dos materiais existentes na base do programa Design Builder.

Depois de definida a estrutura base, o programa calcula um valor de U, associado a cada camada. Para efeito de estudo, foi atribuído um valor pré-definido, correspondente aos coeficientes de transmissão térmica de referência, de acordo com o REH. Esse valor foi introduzido através da função “Set U-Value”. O que o programa faz é identificar a camada de isolamento presente, (assumindo a camada com maior valor de resistência térmica no caso da sua ausência) alterando a sua dimensão de forma a atingir o valor imposto.

**Tabela 5.11 – Caracterização da envolvente para Uref**

Elemento	Materiais	Uref [ $W/m^2 \cdot K$ ]			Espessura [m]		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
Paredes exteriores	Reboco (exterior)	0.40	0.35	0.30	0.02	0.02	0.02
	Tijolo furado 15				0.15	0.15	0.15
	Caixa-de-ar				0.035*	0.023*	0.006*
	Poliestireno extrudido (XPS)				0.055*	0.067*	0.084*

	Tijolo furado 11				0.11	0.11	0.11
	Reboco (interior)				0.02	0.02	0.02
Pavimento interior	Betão (exterior)	0.50			0.2		
	Camada de regularização				0.05		
	Poliestireno extrudido (XPS)				0.044*		
	Caixa-de-ar				0.006*		
	Piso de madeira (interior)				0.01		
Laje de Cobertura	Proteção pesada	0.35	0.30	0.25	50	50	50
	Poliestireno extrudido (XPS)				0.077*	0.093*	0.116*
	Laje de betão				0.2	0.2	0.2
	Caixa-de-ar				0.053*	0.037*	0.014*
	Gesso cartonado				0.02	0.02	0.02
Parede interior	Gesso cartonado	0.80	0.70	0.60	0.02	0.02	0.02
	Tijolo furado 7				0.07	0.07	0.07
	Caixa-de-ar				0.03*	0.022*	0.011*
	Lã de Rocha				0.02*	0.028*	0.039*
	Tijolo furado 7				0.07	0.07	0.07
	Gesso cartonado				0.02	0.02	0.02

\*Nota: De forma a não haver discrepâncias na espessura de cada camada, a diferença foi ajustada pela variação da dimensão da caixa-de-ar existente.

### 5.3.3.2 Envidraçados

No separador “*Openings*” são definidas as características das janelas e superfícies envidraçadas, onde é possível optar por vidro simples ou por camada. Para efeito de estudo optou-se pela opção do vidro simples, em que se pode inserir o valor do coeficiente de transmissão térmica, o coeficiente de ganho de calor solar e a transmissão de luz visível. Os fatores solares e coeficientes de transmissão térmica dos envidraçados foram estabelecidos com base nos valores de referência do REH.

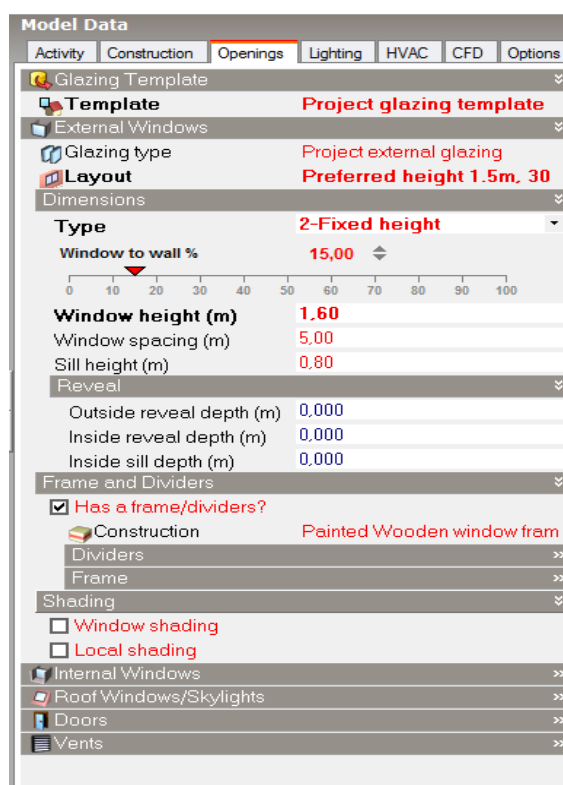


Figura 5.10 - Pormenor do separador *openings*

### 5.3.4 Climatização

Como já foi referido, numa primeira fase não será usado ventilação mecânica, sendo apenas a ventilação natural.

No que se refere a ventilação natural o programa oferece duas opções distintas:

- *Schedule Natural Ventilation* - em que se define o valor do caudal de renovação de ar em cada zona, o valor constante do caudal de infiltração e se estabelece um horário de funcionamento, bem como a gama de temperaturas em que a ventilação ocorre;

- *Calculated Natural Ventilation* – é calculado o caudal de infiltração e circulação de ar com base na abertura de janelas, fissuras, diferenças de pressão derivadas do vento e é controlado através de uma temperatura *setpoint*.

A segunda opção está mais próximo da realidade, uma vez que, na prática, a ventilação natural não pode ser controlada com um horário de funcionamento. Contudo, nas especificações no programa é recomendado o uso da opção *Schedule Natural Ventilation* por ser mais fácil e rápido de inserir os dados e também a simulação é executada mais rapidamente. Por esse motivo optou-se pela primeira opção.

Foi considerado que o edifício é ventilado em permanência por uma caudal mínimo de ar, que corresponde a infiltrações de ar no edifício, através de pequenas fissuras ou defeitos na construção, com um valor de 0.6 renovações de ar por hora (rph), estando em conformidade com o regulamento REH, que considera um valor mínimo de 0.4 renovações de ar por hora..

Foi também definido ventilação natural noturna, referente à circulação de ar devido a aberturas exteriores, de 0.5 rph. Desta forma é possível arrefecer o ambiente interior no período noturno durante a estação de arrefecimento, facilitando a libertação de energia que foi absorvida durante o dia pelo PCM. Fixou-se a temperatura de *setpoint* de ventilação nos 20°C como também um  $\Delta T$  de 2°C, o que significaria que o programa deixa de considerar a renovação de ar assim que a temperatura interior estiver abaixo dos 20°C e quando a diferença da temperatura interior e exterior for de pelo menos 2°C.

No que se refere ao caudal de ar que circula através de aberturas interiores, encontra-se definido por defeito em  $0.1\text{m}^3/\text{s.m}^2$ . Por falta de informação detalhada, optou-se por não alterar esse valor.

### 5.3.5 Atividade

No separador *activity* é definido o tipo de ocupação, ou seja, será o número de pessoas que ocupam o espaço durante um determinado espaço de tempo, definidos pelo template escolhido.

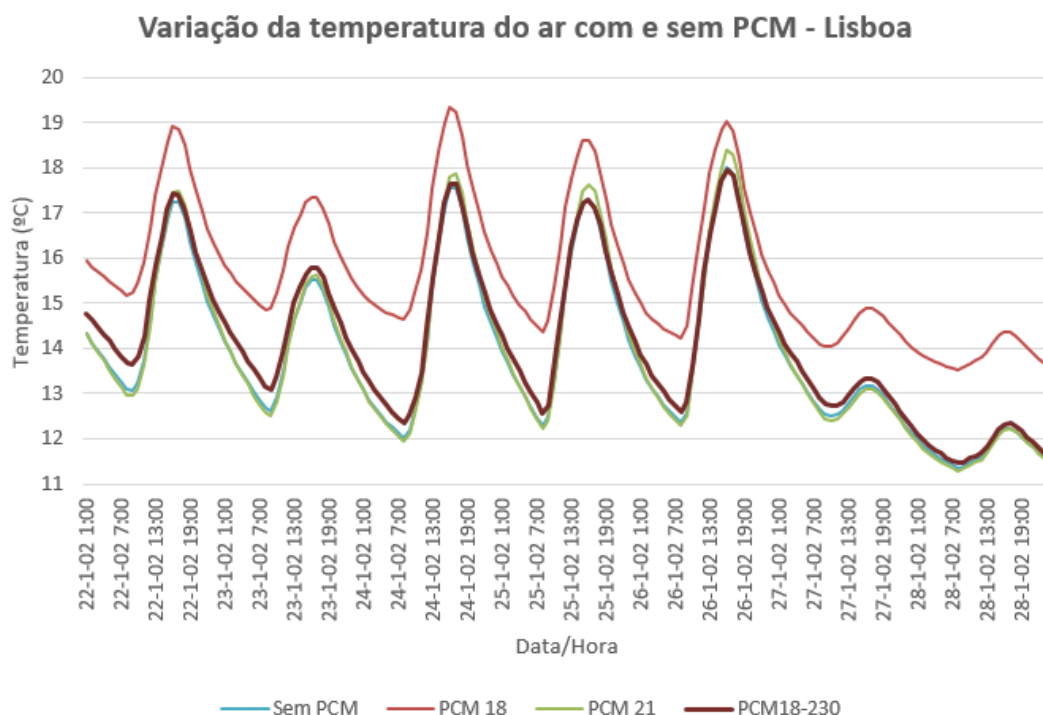
Um valor importante é o *Heating Setpoint Temperatures*, que define a temperatura quando o aquecimento será necessário no espaço. Por outro lado temos o *Cooling Setpoint Temperatures*, que define a temperatura em que o arrefecimento do espaço será

necessário. Neste caso será 20 e 25 °C, respetivamente, respeitando as condições de conforto interior de referência, de acordo com o REH.

### 5.3.6 Seleção dos PCM's

O *software* oferece-nos a escolha de um vasto número de opções de PCM's, denominados de BioPCM's. BioPCM é o nome comercial de uma família de materiais de mudança de fase com uma base biológica, distinguindo-se ao nível da capacidade de armazenamento de calor e do intervalo de temperaturas de fusão. Trata-se de um isolamento com bolsas de material de mudança de fase (produtos químicos à base de soja em que ocorre a mudança do estado líquido ao sólido e vice-versa, em diferentes temperaturas, permitindo que o material absorva e liberte calor). No programa é possível escolher 4 classes distintas: M27, M51, M91 e M182, distinguíveis ao nível de espessura. A sigla M refere-se à capacidade de armazenamento de calor latente, dessa forma foi escolhido a classe M51, encontrando-se num nível intermédio. Para cada classe estão disponíveis 5 valores de temperatura de fusão: 21°C, 23°C, 25°C, 27°C e 29°C. Para além destes, selecionou-se dois outros PCM, comercialmente designados por RT18HC e RT15, da marca Rubitherm, com temperaturas de fusão de 18°C e 15°C respetivamente, uma vez que o *DesignBuilder* não possui PCM com temperaturas de fusão inferiores a 21°C. Dessa forma, através dos dados fornecidos pelo site da marca Rubitherm (<http://www.rubitherm.eu/>), foi possível editar dados no programa e criar novas soluções.

De referir que, a densidade do PCM da Rubitherm é bastante superior ao BioPCM disponível no programa, sendo 800kg/m<sup>3</sup> e 230kg/m<sup>3</sup>, respetivamente. Este factor vai afetar o funcionamento do PCM, em termos de *internal heat capacity*, o que irá promover uma discrepância entre valores, o que é perceptível na Figura 5.11. Dessa forma, para efeitos de cálculo, o valor da densidade do bioPCM foi editado para igualar o valor do PCM da Rubitherm, encontrando-se mais próximo do valor comercial usual e dessa forma se poder comparar com maior precisão a variação do ponto de fusão, em condições de densidade semelhantes. De forma a ser mais fácil de interpretar, os BioPCM's e PCM da Rubitherm serão denominados de "PCM" seguido da sua temperatura de fusão (exemplo: BioPCM M51/Q29 passa a PCM 29 e RT18HC passa a PCM 18).



**Figura 5.11 – Gráfico ilustrativo da variação de densidade do PCM 18, com densidade de  $800\text{kg/m}^3$  e  $230\text{kg/m}^3$ , PCM 18 e PCM 18-230 respetivamente.**

No anexo A.1 encontram-se as curvas de temperatura-entalpia dos PCM utilizados.

## 5.4 Estudo de sensibilidade

Este estudo é realizado apenas para uma zona climática, no caso Lisboa. Esta razão prende-se pelo facto de assim não concentrar demasiada informação e também porque se trata de uma região com a maior densidade populacional do país, com cerca de 1/3 da população portuguesa. A aplicação dos PCM utilizados serão definidos com base na conclusão da análise anterior feita para Lisboa.

Neste estudo foram realizadas as seguintes análises:

- Variação das renovações horárias desde 1 até 10 rph no período noturno – Tem como objetivo perceber de que forma este parâmetro afeta o potencial efeito do PCM. Será determinante para perceber até que ponto o incremento das renovações de ventilação poderá facilitar a libertação de energia absorvida durante o dia.
- Variação da área do envidraçado – Tem como objetivo analisar de que forma o PCM irá-se comportar variando os ganhos solares na célula de teste.

- Proteções solares – Tem como objetivo compreender a influência de estratégias na limitação de ganhos solares, uma vez que o sobreaquecimento da célula prejudica a análise do comportamento do PCM.

Nesta fase foi mantida a mesma geometria externa da célula de teste, dividida em 5 zonas térmicas, como descrito.

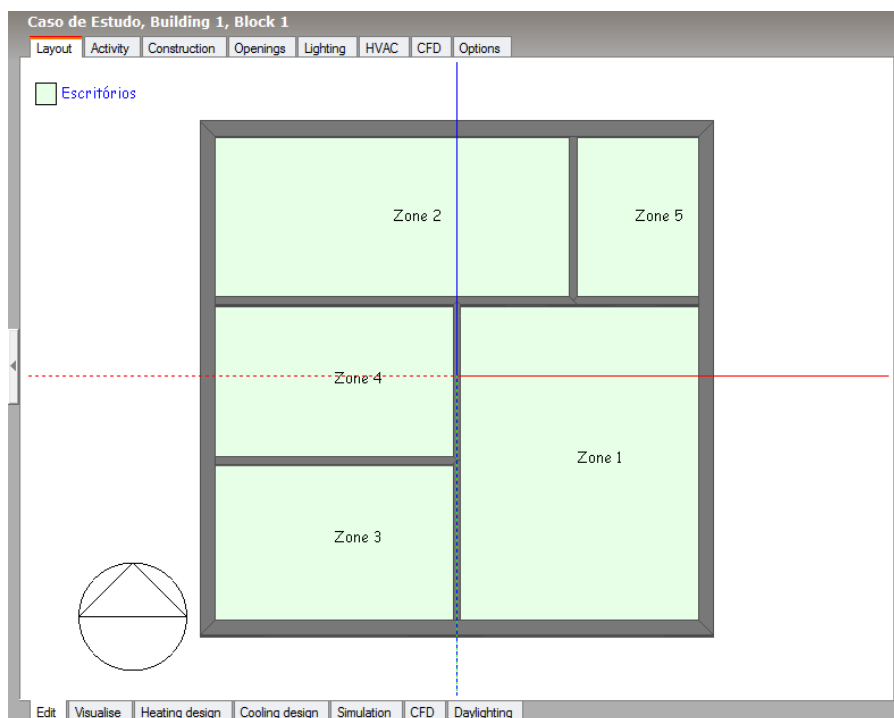


Figura 5.12 – Pormenor da célula de teste.

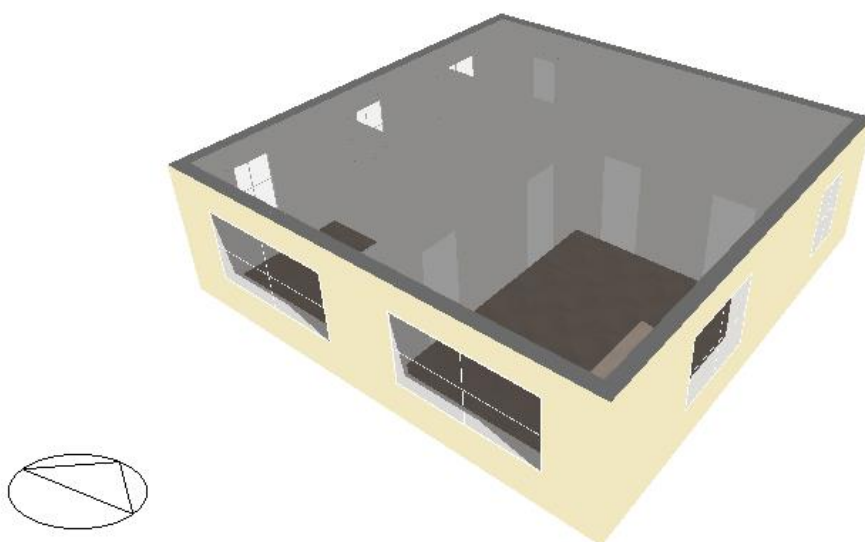
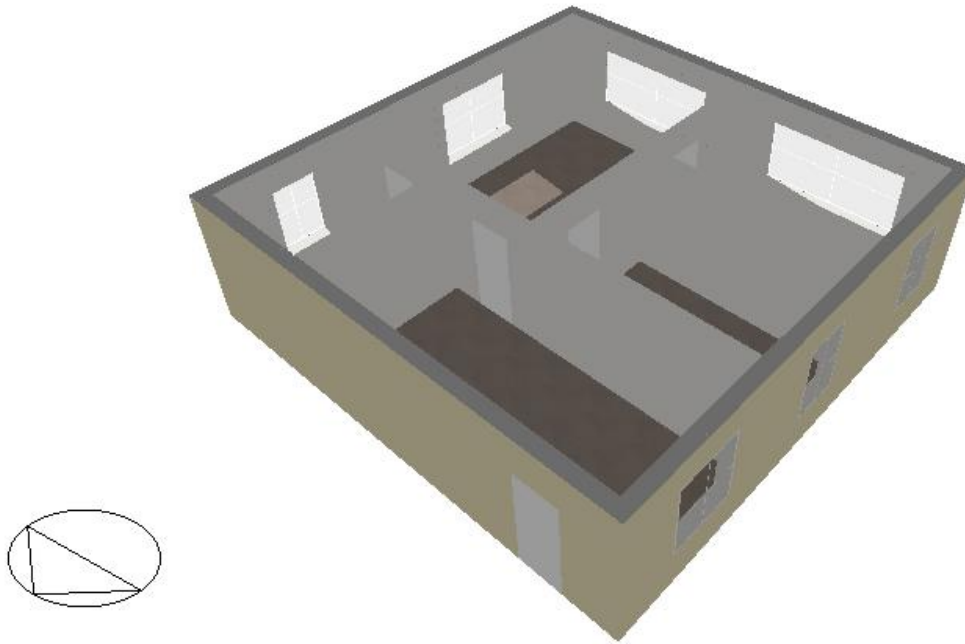


Figura 5.13 – Renderização do modelo geométrico criado no Designbuilder, vista do alçado Sul, com exposição solar do dia 9 Julho às 9:00.





**Figura 5.14 -** Renderização do modelo geométrico criado no Designbuilder, vista do alçado Norte, com exposição solar do dia 9 Julho às 9:00.

Na Tabela 5.12 encontra-se a descrição das zonas, tendo em conta a estrutura de uma habitação unifamiliar.

**Tabela 5.12 –** Listagem das zonas térmicas

<b>Designação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Área (<math>m^2</math>)</b>
<b>Zona 1</b>	Sala de estar	29.22
<b>Zona 2</b>	Cozinha	22.35
<b>Zona 3</b>	Quarto 1	14.61
<b>Zona 4</b>	Quarto 2	14.61
<b>Zona 5</b>	Casa de banho	7.84

### **5.5 Estudo com sistema ativo**

Neste estudo é considerado um sistema ativo, uma vez que o consumo energético não depende unicamente das suas características ou condições climáticas mas também de factores como os ganhos internos de calor devido à ocupação, iluminação e utilização dos

equipamentos.

Em termos de ocupação foi considerado a presença de 3 ocupantes (1 casal e 1 criança). No que se refere à permanência dos ocupantes, foram definidos horários para cada zona, para cada hora e todos os dias do ano. As zonas com maior número de horas de ocupação durante o dia são as zonas 1 e 2 (sala e cozinha), sendo mais predominante no fim-de-semana, em que os ocupantes passam mais tempo em casa. Durante os dias úteis, no período das 8h às 19h foi considerado que não existe ocupação e nos períodos das 19h às 23h é a ocupação é repartida de forma equivalente entre a sala e a cozinha, que seria o horário de chegada do trabalho/escola. Nos restantes dias, apesar de também ter sido definida uma percentagem de tempo de ocupação nas restantes zonas, a cozinha e a sala detêm a maior percentagem.

Na iluminação foi considerado o tipo de lâmpada e potência, como é descrito na Tabela 5.13.

Em termos de horários, foi definido conforme a permanência dos ocupantes, tendo em conta que durante o dia até ao período da noite não seria necessário, podendo tirar proveito da iluminação natural.

**Tabela 5.13 - Descrição da iluminação considerada no sistema ativo**

	<b>Quarto 1</b>	<b>WC</b>	<b>Cozinha</b>	<b>Quarto 2</b>	<b>Sala</b>
Tipo de lâmpada	Inc.	Fluo.	Fluo.	Inc.	Inc.
Potência	240 W (4x60)	46 W (2x23)	138 W (6x23)	240 W (4x60)	480 W (8x60)
Potência/Área	18 W/m <sup>2</sup>	6W/m <sup>2</sup>	6 W/m <sup>2</sup>	18 W/m <sup>2</sup>	16 W/m <sup>2</sup>

Nota: Inc: Incandescente / Fluo: Fluorescente

No que se refere a equipamentos, a cozinha é a zona que tem mais utilização. Na Tabela 5.14 são apresentados os equipamentos e os valores de potência considerados.

Tabela 5.14 – Descrição do equipamento elétrico considerado

Zona térmica	Equipamento	Potência	Potência/Área
Cozinha	Forno/microondas/placa vitrocerâmica	2000W	$89 \text{ W/m}^2$
	Frigorífico + congelador	400W	$18 \text{ W/m}^2$
Sala	Tv + aparelhagem de som	150W	$5 \text{ W/m}^2$

Em termos de horários, na cozinha, é considerado a utilização de equipamentos na cozinha durante 2 horas ao longo dos dias úteis e 3 horas nos dias não úteis, que se refere à preparação das refeições. Considerou-se a existência permanente de frigorífico e congelador, que se encontram sempre ligados.

Na sala, a utilização de equipamentos foi considerada conforme a permanência dos ocupantes.

Depois de definidos todos os parâmetros associados a ganhos internos, o estudo é realizado de forma a encontrar as zonas mais desfavoráveis, sem PCM, podendo dessa forma otimizar a solução de uma forma mais específica, com PCM adequado.

## 5.6 Opções avançadas de cálculo

### 5.6.1 Aplicação de materiais de mudança de fase no DesignBuilder

Para a simulação com aplicação dos PCM's na "célula de teste" foi necessário ter em conta alguns parâmetros:

- *"Timestep"*: 12. Os passos de tempo por hora (*time steps per hour*) pode ser traduzido como o número de vezes que a rede térmica é resolvida, por hora, nas simulações. Valores mais elevados aumentam a precisão, tornando por sua vez as simulações mais longas.
- *Solution algorithm*: 2 - *Finite difference*. É a única solução de calor sensível e não leva em conta o armazenamento de humidade ou a difusão dos elementos de construção. Esta opção é necessária para simulações com PCM.

- *Difference Scheme: 1 - Fully implicit first order.* É o sistema de primeira ordem no tempo e é mais estável ao longo do tempo.

- *Space discretisation constant: 3* - A constante de discretização do espaço controla o modo como o modelo determina o número de nós utilizados para representar cada camada de material na construção. O modelo calcula a distância nominal associado a um nó,  $\Delta x$ , utilizando-se:

$$\Delta x = (C\alpha\Delta t)^{0.5} \quad (4.1)$$

em que:

$\alpha$  - difusidade térmica da camada de material, em  $m^2/s$ ;

$\Delta t$  - duração do *timestep* em segundos;

$C$  – constante definida por este campo

- *Relaxation factor: 1* - O sistema *finite difference* inclui valores de relaxamento menores para melhorar a estabilidade de interações com as outras superfícies. Valores maiores permitem uma resolução mais rápida, enquanto que valores menores permitem mais estabilidade.

- *Inside face surface temperature convergence criteria: 0,01* - O modelo do balanço de calor da superfície da face interior tem uma resolução numérica que usa um parâmetro de convergência para um máximo permitido de diferenças na temperatura da superfície. Valores mais baixos podem aumentar ainda mais a estabilidade, no entanto a sua duração será maior. As unidades são em °C ou °F.

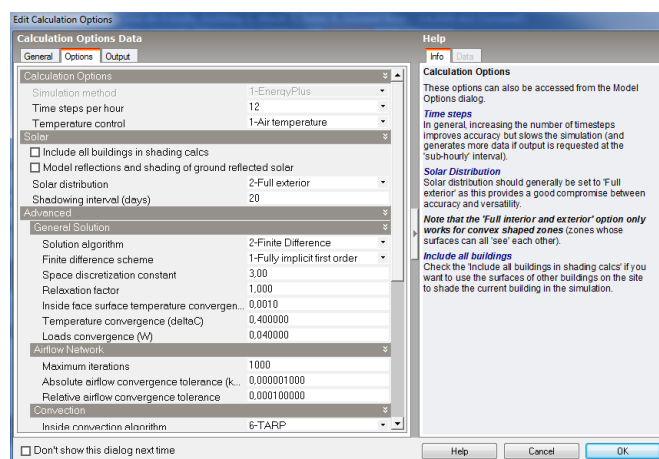


Figura 5.15 - Janela de edição dos parâmetros de cálculo

---

## *Capítulo 6*

### *Resultados e discussão*

## Capítulo 6. Resultados e discussão

### 6.1 Simulação da célula de teste

O objetivo da simulação dinâmica é comparar o comportamento térmico e os consumos energéticos de um espaço com e sem incorporação de PCM.

Podemos dividir as simulações da seguinte forma:

- 1º Fase:

Comparação da eficiência de PCMs mediante a sua localização numa camada:

P1 – Aplicação na face exterior da parede exterior e cobertura;

P2 – Aplicação na face interior da parede exterior e cobertura;

P3 – Aplicação na caixa-de-ar da parede exterior e cobertura.

Esta simulação tem como objetivo perceber de que forma o PCM quando aplicado em diferentes zonas de uma camada altera as condições de conforto e consumo energético. A simulação é realizada para 2 dias da semana mais quente, para Lisboa, com aplicação de PCM 29.

- 2º Fase:

Aplicação dos diferentes tipos de PCM na parede exterior e cobertura, para as várias zonas climáticas de estudo, com aplicação pelo interior, como ilustrado na Figura 6.1 e Figura 6.2.



Figura 6.1 – Ilustração da constituição da parede exterior com PCM pelo interior



**Figura 6.2 - Ilustração da constituição da cobertura com PCM pelo interior**

- 3º Fase

Nesta fase a célula de teste foi dividida em 5 zonas, aproximando dessa forma de um caso real de uma habitação unifamiliar, fazendo posteriormente a análise das necessidades energéticas para os vários climas e PCMs em estudo. Para além dos PCMs em estudo, com aplicação nas paredes exteriores e cobertura, foi também selecionado uma combinação, que seria a junção do PCM que teve melhor desempenho na estação de aquecimento e o que teve melhor desempenho na estação de arrefecimento, podendo dessa forma otimizar uma solução.

- 4º Fase

Estudo de sensibilidade, em Lisboa, com o objetivo de avaliar o comportamento térmico do edifício, com variação de alguns parâmetros.

- 5º Fase

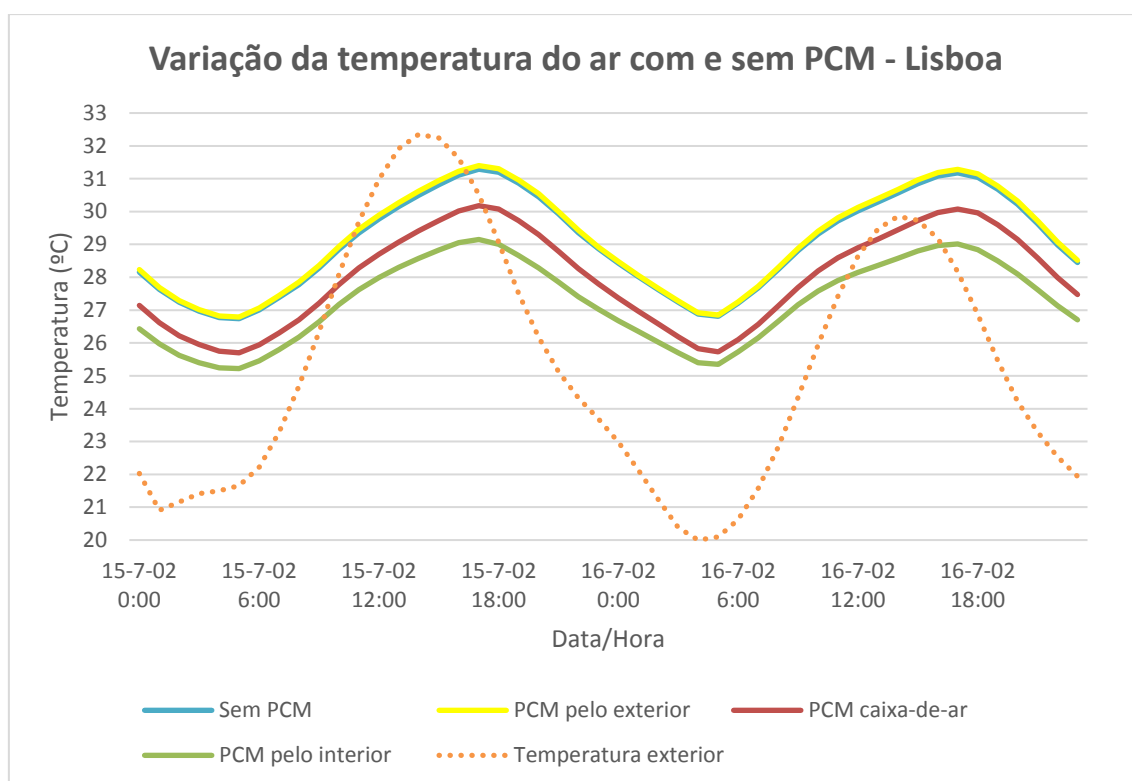
Continuação do estudo, considerando um sistema ativo, analisando de uma forma mais pormenorizada a incorporação de PCM na zona mais desfavorável.

### 6.1.1 1º Fase de simulações

Como foi descrito, nesta fase será estudado o comportamento do PCM, mediante a sua localização numa determinada camada, neste caso na parede exterior e cobertura da célula de teste. A análise cinge-se apenas a 2 dias (15 e 16 de Julho), 1 localização (neste caso

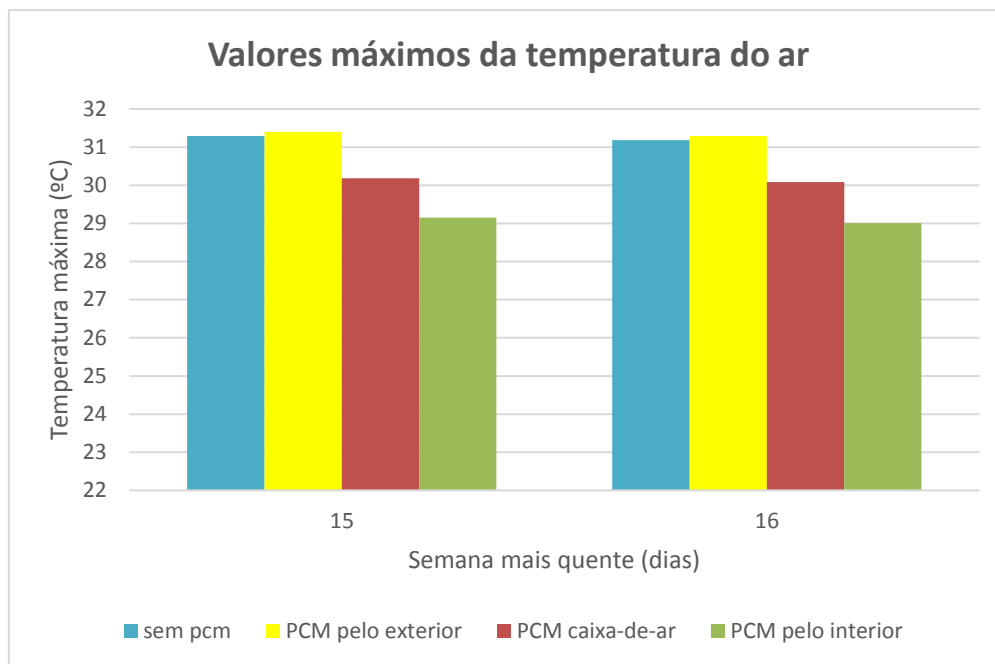
Lisboa) e com o PCM 29, de forma a não concentrar demasiada informação e permitir uma interpretação mais fácil dos resultados.

Como é possível verificar pela análise da Figura 6.3 e Figura 6.4, a solução de colocação da camada de PCM pelo interior é a melhor, sendo que no dia com temperatura interior mais elevada (dia 15), obtém uma redução de 2.14°C face à solução com PCM pelo exterior, em que o seu funcionamento foi nulo. É possível concluir que quanto mais próximo do interior estiver melhor será a capacidade de armazenamento térmico, visível pelo melhoramento gradual das soluções da localização do PCM.



**Figura 6.3 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo de 2 dias da semana mais quente, 15-16 Julho, em Lisboa.**





**Figura 6.4 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, 15-16 de Julho, com e sem PCM, para Lisboa.**

Desta forma, para futuros cálculos, será adotada a solução de aplicação de PCM pelo interior.

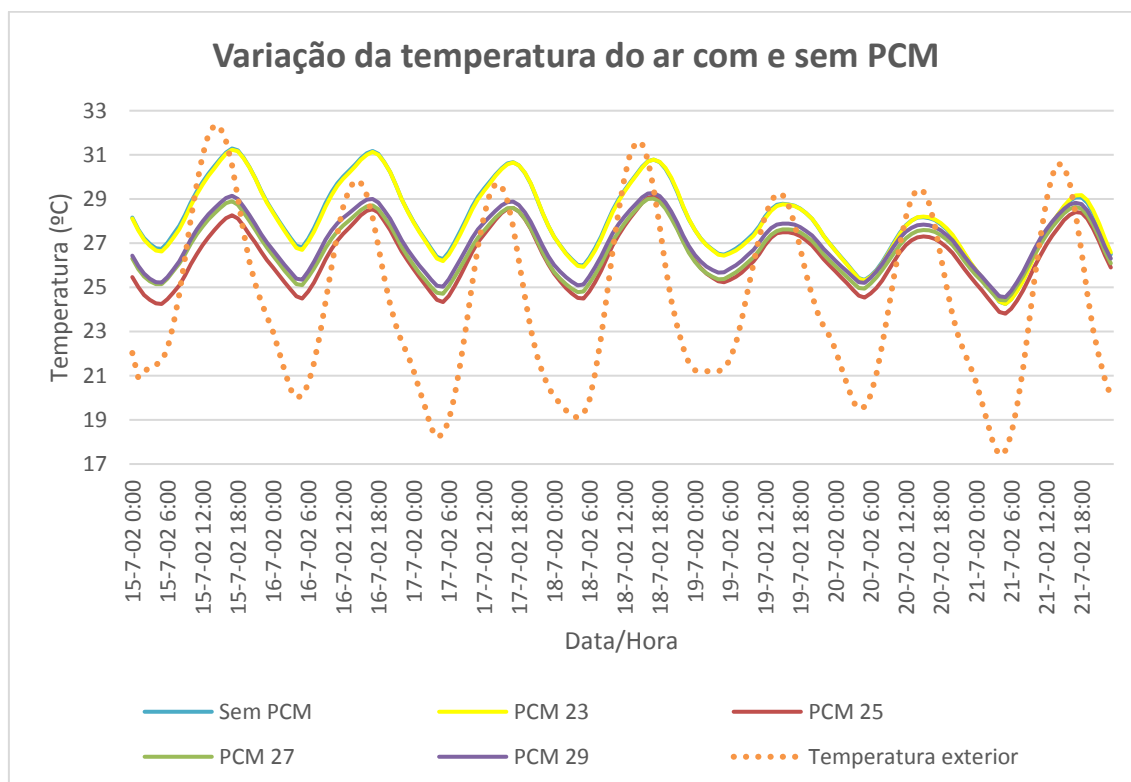
### 6.1.2 2º Fase de simulações

Nesta fase de simulações é feita uma análise dos diferentes tipos de PCM, aplicados pelo interior, para as zonas climáticas definidas, de forma a encontrar a melhor solução. A simulação foi realizada para a semana mais quente (*Summer design week*), considerando PCM com temperaturas de fusão mais elevadas (23°C, 25°C, 27°C e 29°C) e para a semana mais fria (*Winter design week*), PCM com temperaturas de fusão mais baixas (15°C, 18°C e 21°C). De seguida apresentam-se os estudos de sensibilidade para a região de Lisboa, Porto, Évora, Viseu, Aveiro, Lamego e Bragança.

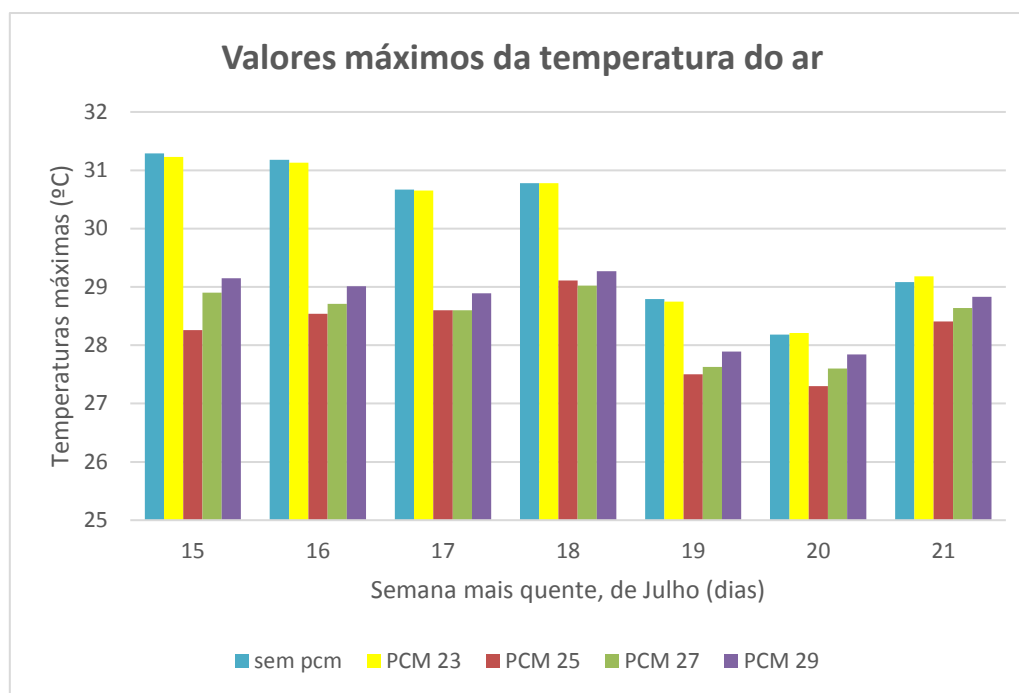
- **Lisboa**

Uma análise atenta aos gráficos na Figura 6.5 e Figura 6.6, permite concluir que todos os PCM aplicados, em exceção do PCM 23, apresentam uma diferença nos picos de temperatura máximos atingidos, sendo que no dia de pico de temperatura máxima (dia 15 de Julho), o PCM 25 e PCM 27 assumem os melhores resultados em termos de redução da temperatura máxima, destacando uma diminuição de 3.03°C com a aplicação de PCM 25 face à opção sem PCM. É possível observar, nomeadamente nos dias 19, 20 e 21,

quando as temperaturas são um pouco mais baixas, o PCM 27 e PCM 29 não são tão eficientes, o que pode ser explicado pela aproximação do ponto de fusão dos PCMs em questão, não completando os ciclos de fusão/solidificação. Pela mesma razão poderá ser justificado o funcionamento ineficaz por parte do PCM 23 face às altas temperaturas apresentadas.



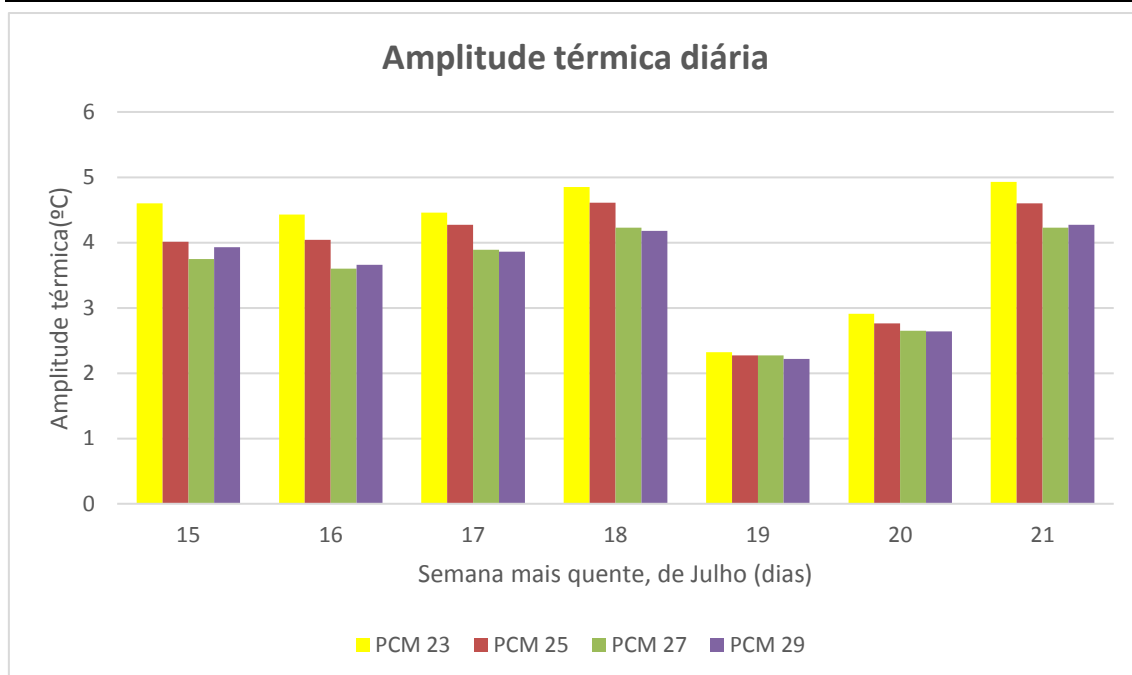
**Figura 6.5 – Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 15-21 Julho, em Lisboa.**



**Figura 6.6 – Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, de Julho, com e sem PCM, em Lisboa.**

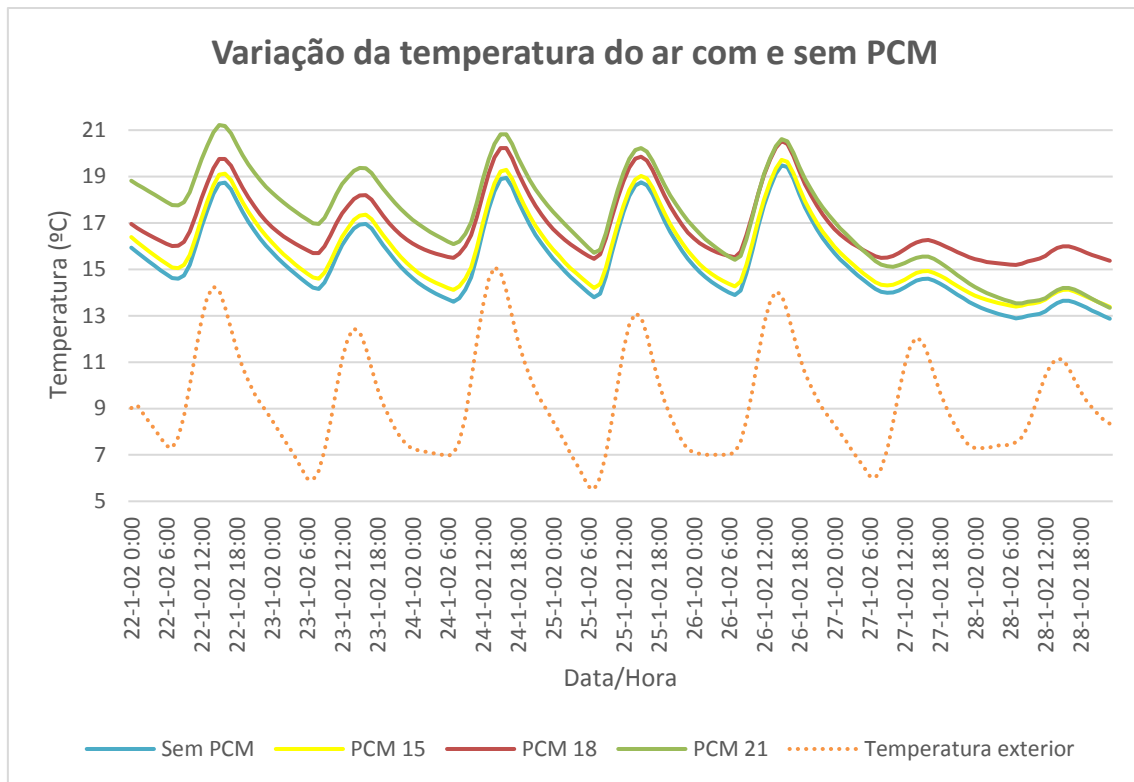
Outro critério importante para poder avaliar qual a melhor solução será a amplitude térmica diária. Quanto menor for esta grandeza, melhor será o funcionamento do PCM. Desta forma, no gráfico seguinte é apresentado os valores máximos de amplitude térmica, para cada dia da semana de 15 a 21 de Julho.

Pela análise da Figura 6.7 podemos concluir que o PCM 27 e PCM 29 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o PCM 23 o mais desfavorável. Apesar disso, o PCM 25 é aquele que assume melhor desempenho em aproximar da zona de conforto térmico e por isso será a opção mais vantajosa, para o presente caso de estudo, em Lisboa, considerando apenas ventilação natural.

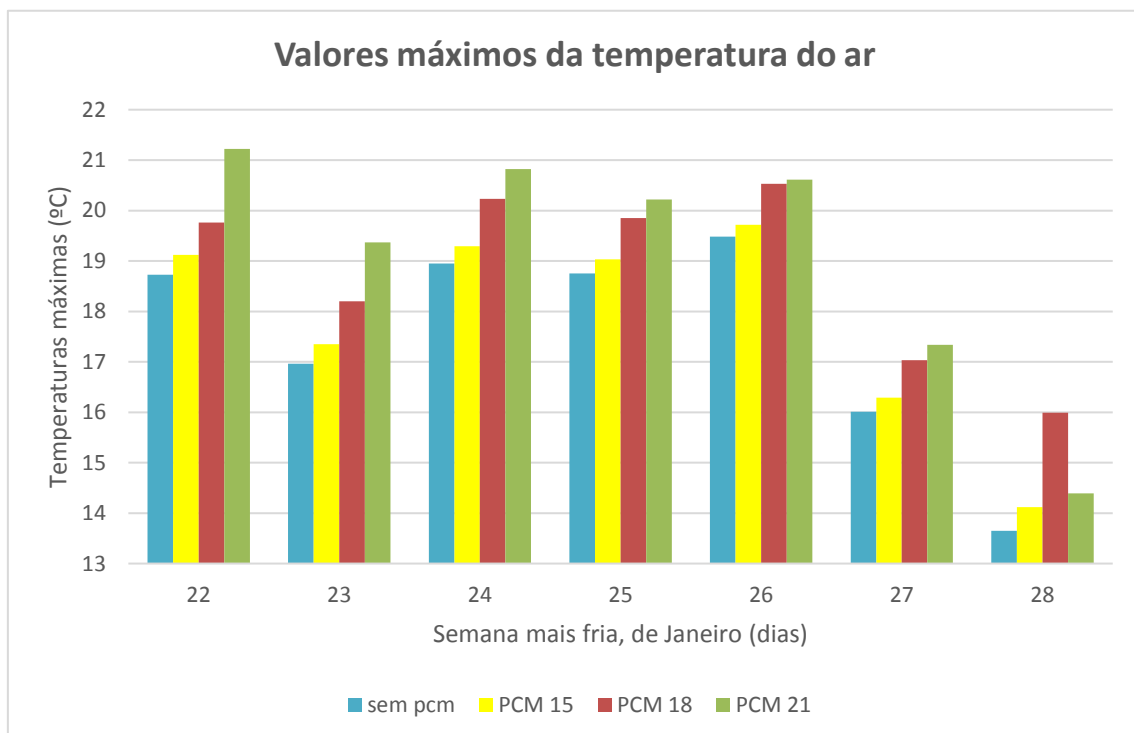


**Figura 6.7 – Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Lisboa.**

Pela análise da Figura 6.8 e Figura 6.9, permite concluir que o PCM 18 e PCM 21 apresentam o melhor desempenho, sendo que se destaca o PCM 21 de uma forma geral em todos os dias da semana, excepto nos dias 27 e 28, de menor temperatura e radiação solar, como é visível na Figura A.7. É possível concluir que à medida que a temperatura se afasta do ponto de fusão do PCM 21, este deixa de ser eficiente, uma vez que não completa os ciclos de fusão/solidificação. De referir o aumento de 1.13 °C no dia 22 por parte do PCM 21, face à solução sem PCM e 2.34°C no dia 28 por parte do PCM 18, face à solução sem PCM, com uma diferença de 5.08°C na temperatura do ar entre esses dias.



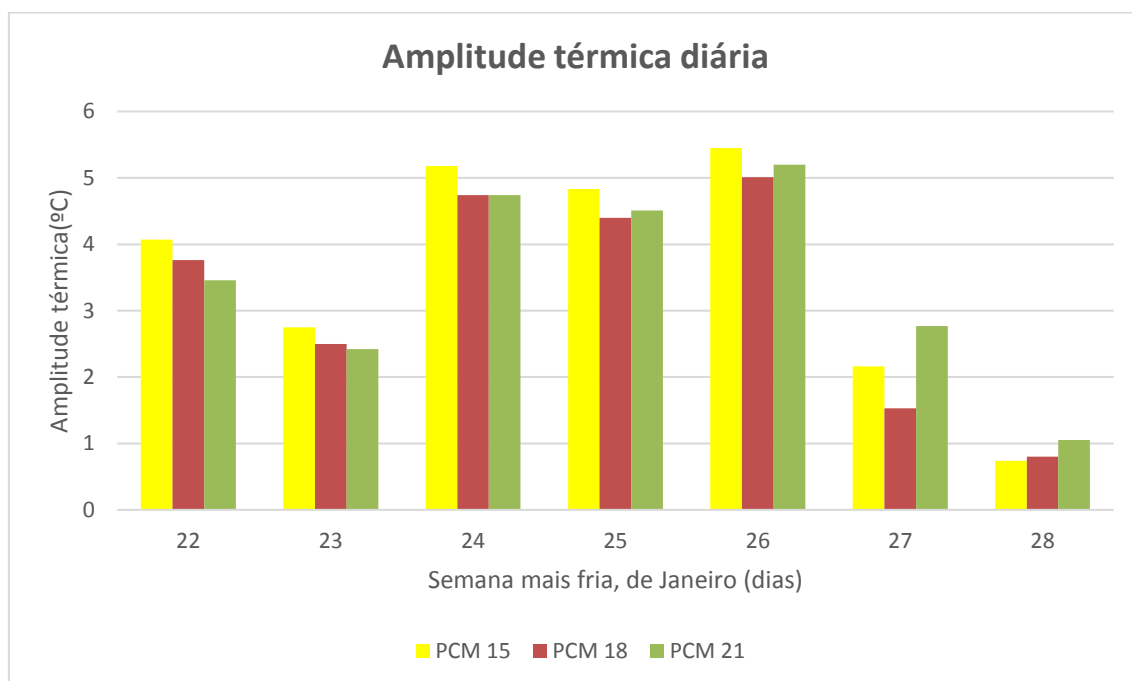
**Figura 6.8 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 22-28 Janeiro, em Lisboa.**



**Figura 6.9 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Lisboa.**

Pela análise da Figura 6.10 podemos concluir que o PCM 18 e PCM 21 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o

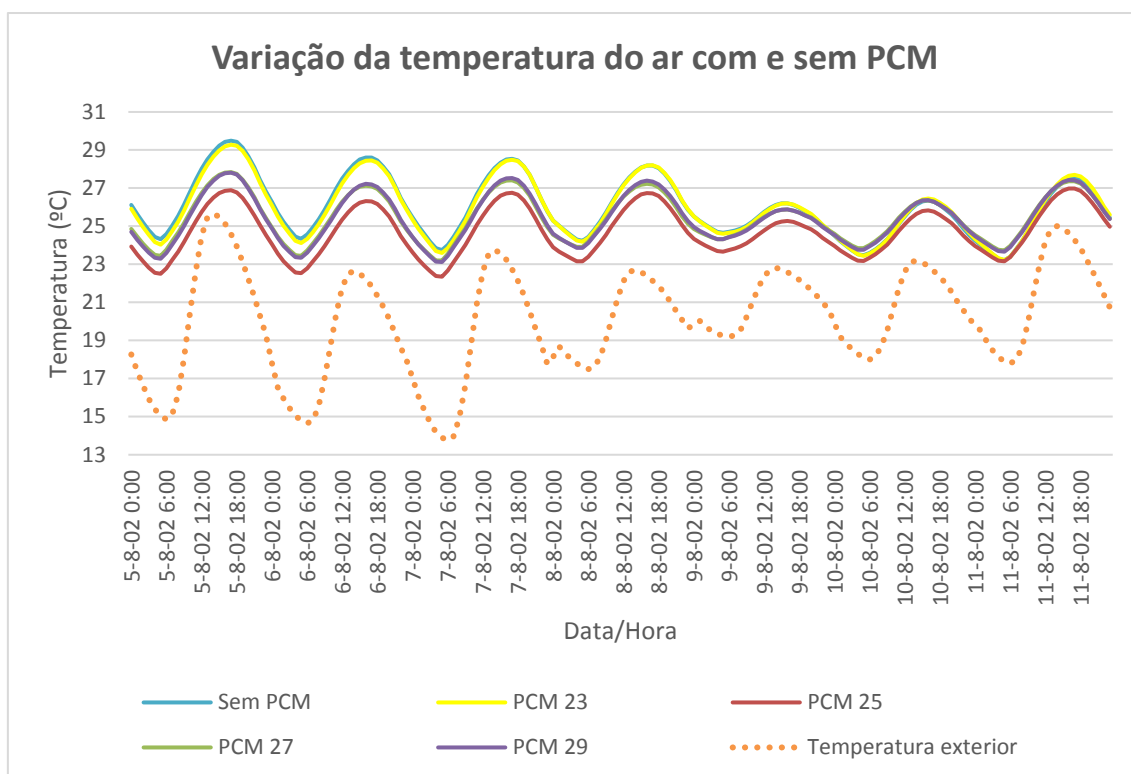
PCM 15 o mais desfavorável. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, na estação de aquecimento, em condições críticas, será com a introdução do PCM 18, atendendo o seu bom funcionamento nos dias de menor temperatura, como é o caso do dia 27 e 28.



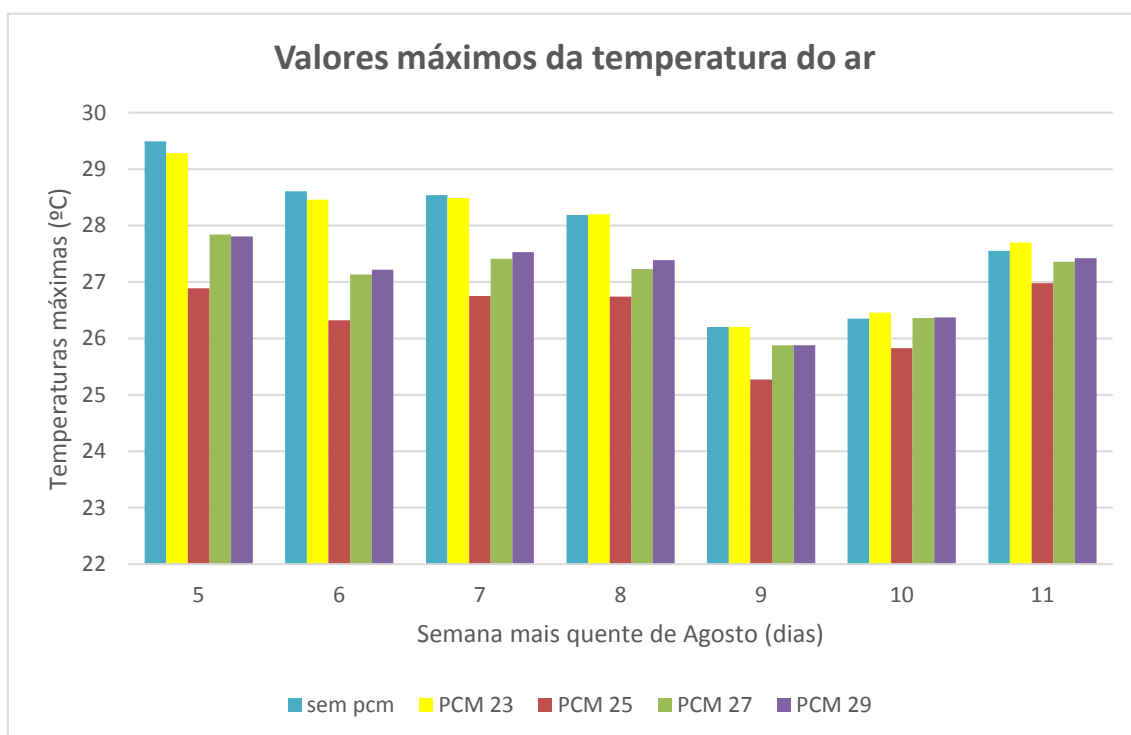
**Figura 6.10 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Lisboa.**

- **Porto**

Uma análise atenta aos gráficos na Figura 6.11 e Figura 6.12, permite concluir que todos os PCM aplicados, em exceção do PCM 23, apresentam uma diferença nos picos de temperatura máximos atingidos, sendo que o PCM 25 e PCM 27 assumem os melhores resultados em termos de redução da temperatura máxima, destacando uma diminuição de 2.60°C com a aplicação de PCM 25 face à opção sem PCM, no dia 5. É possível observar, nomeadamente nos dias 9,10 e 11, quando as temperaturas são um pouco mais baixas, o PCM 27 e PCM 29 não são tão eficientes, o que pode ser explicado pela aproximação do ponto de fusão dos PCMs em questão, não completando os ciclos de fusão/solidificação. Pela mesma razão poderá ser justificado o funcionamento ineficaz por parte do PCM 23 face às altas temperaturas apresentadas.



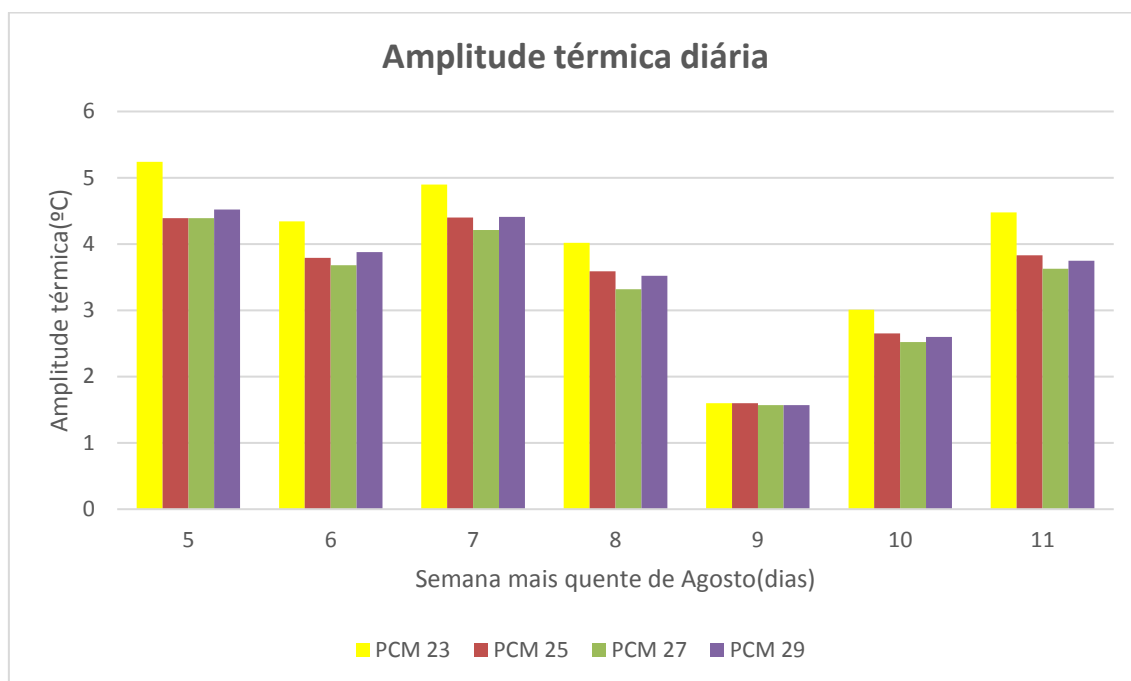
**Figura 6.11 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 5-11 Agosto, em Porto.**



**Figura 6.12 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Porto.**

Pela análise da Figura 6.13 podemos concluir que o PCM 27 e PCM 29 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o

PCM 23 o mais desfavorável. Apesar disso, o PCM 25 é aquele que assume melhor desempenho em aproximar da zona de conforto térmico e por isso será a opção mais vantajosa, para o presente caso de estudo, no Porto, considerando apenas ventilação natural.

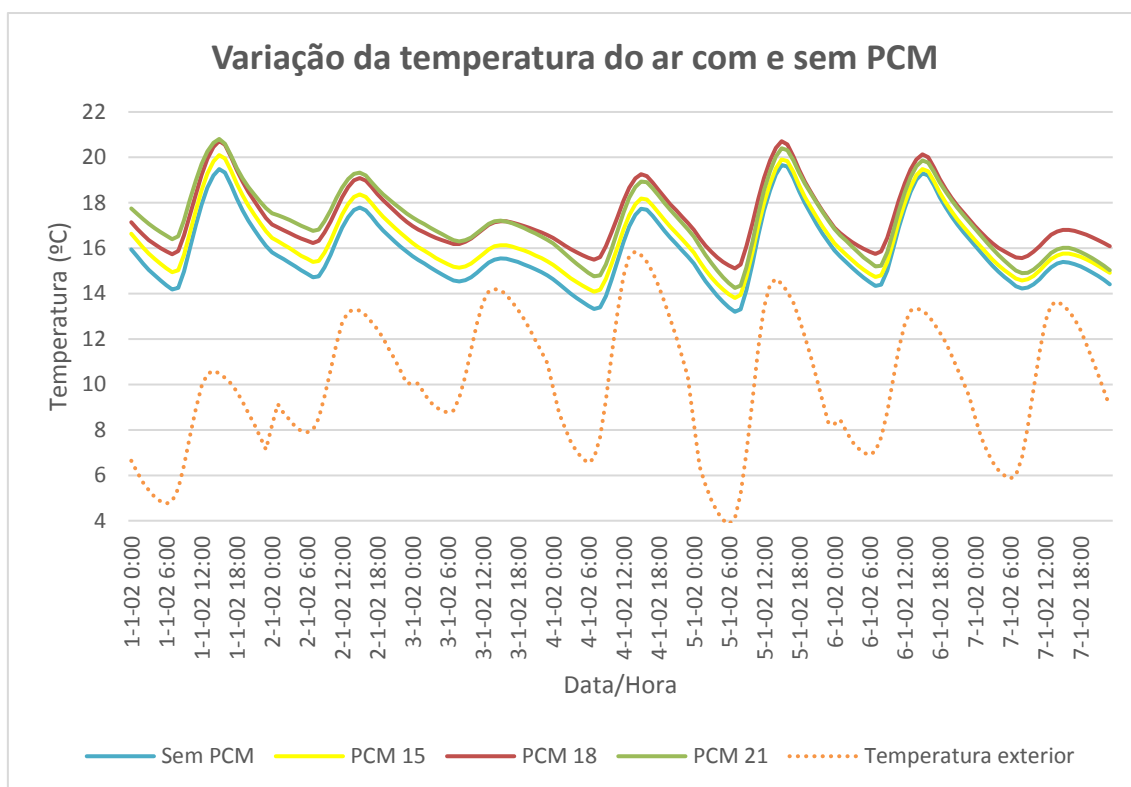


**Figura 6.13 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Porto.**

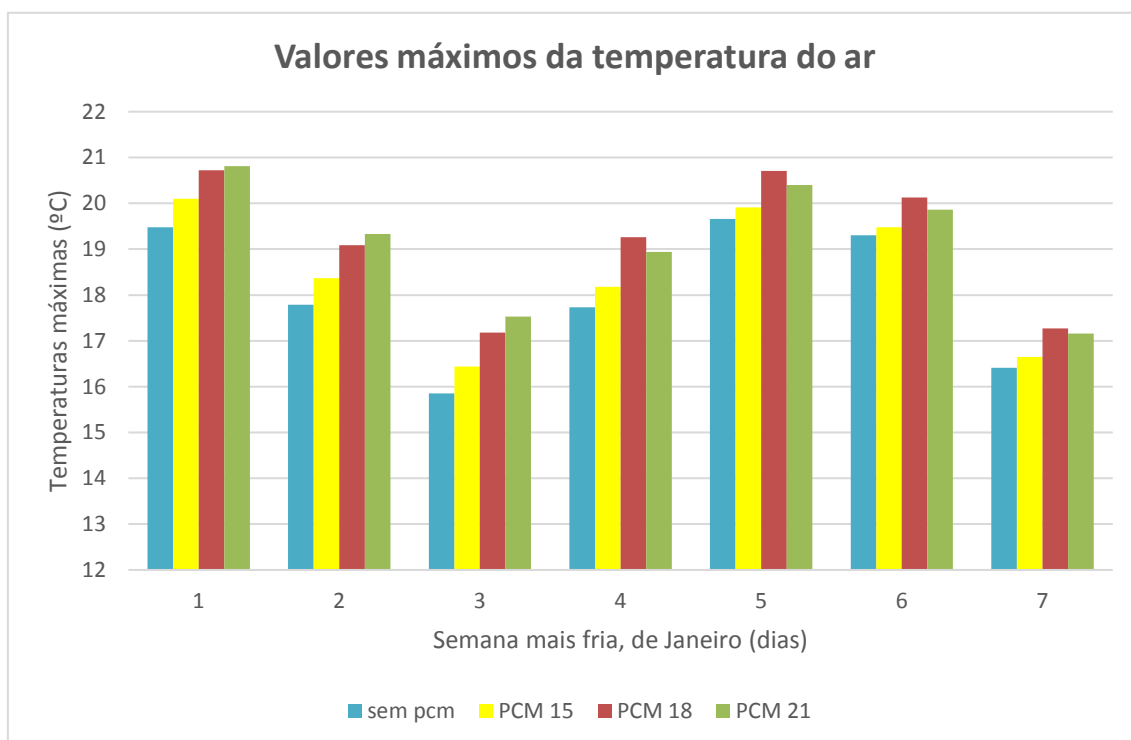
De seguida, é apresentada a análise para a semana mais fria, considerando PCM com temperaturas de fusão mais baixas (15°C, 18°C e 21°C).

Pela análise da Figura 6.14 e Figura 6.15, permite concluir que o PCM 18 e PCM 21 apresentam o melhor desempenho. De salientar que nos dias de menor temperatura e radiação solar, como é visível na Figura A.7, em especial o dia 7 o PCM 21 é ineficaz, assumindo o PCM 18 os melhores resultados. É possível concluir que à medida que a temperatura se afasta do ponto de fusão do PCM 21, este deixa de ser eficiente, uma vez que não completa os ciclos de fusão/solidificação.



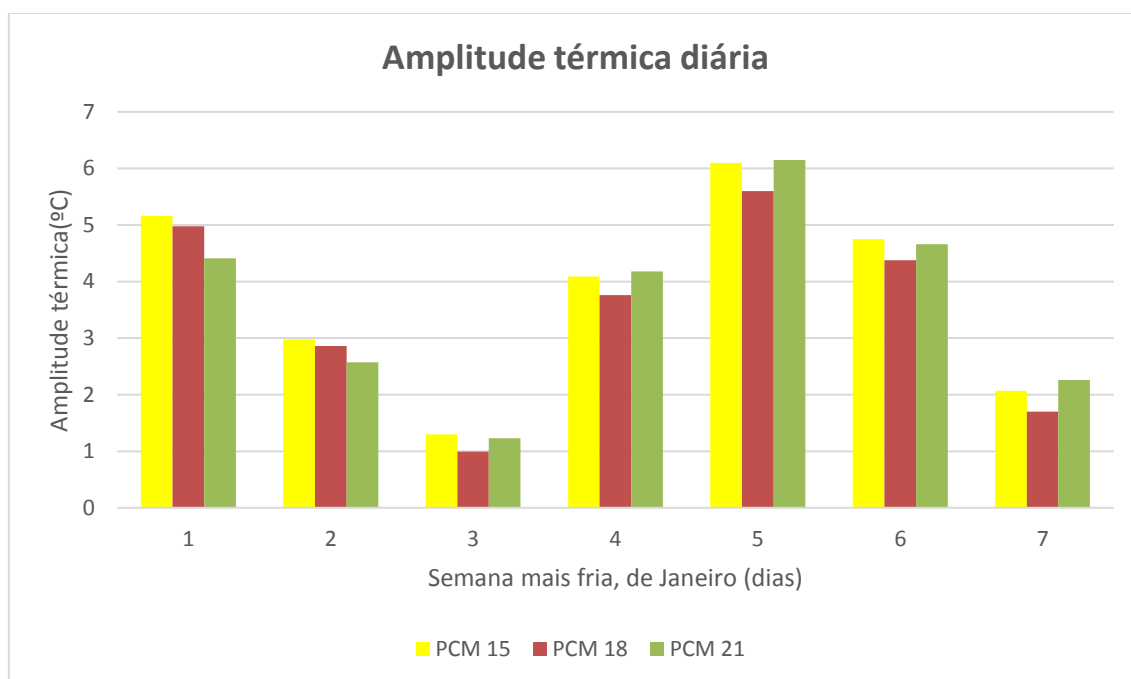


**Figura 6.14 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 01-07 Janeiro, em Porto.**



**Figura 6.15 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Porto.**

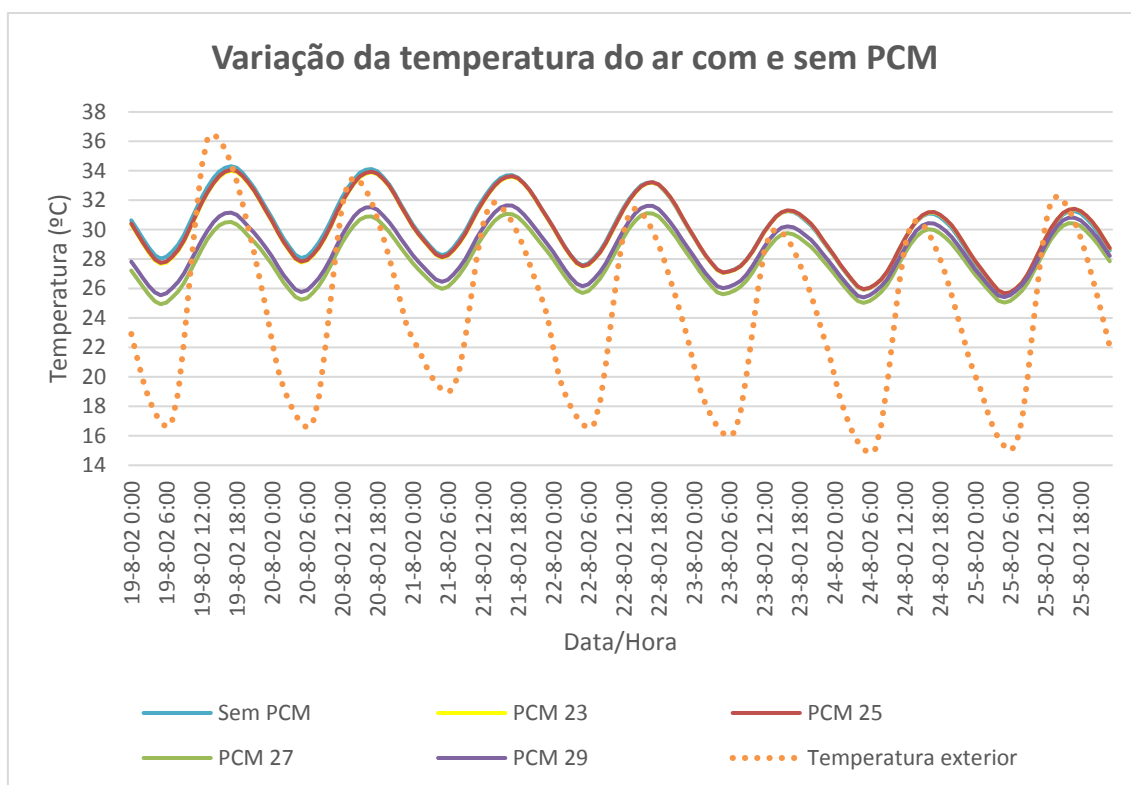
Pela análise da Figura 6.16 podemos concluir que o PCM 18 e PCM 21 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o PCM 15 o mais desfavorável. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, na estação de aquecimento, em condições críticas, será com a introdução do PCM 18, atendendo o seu bom funcionamento nos dias de menor temperatura, como é o caso do dia 3 e 7.



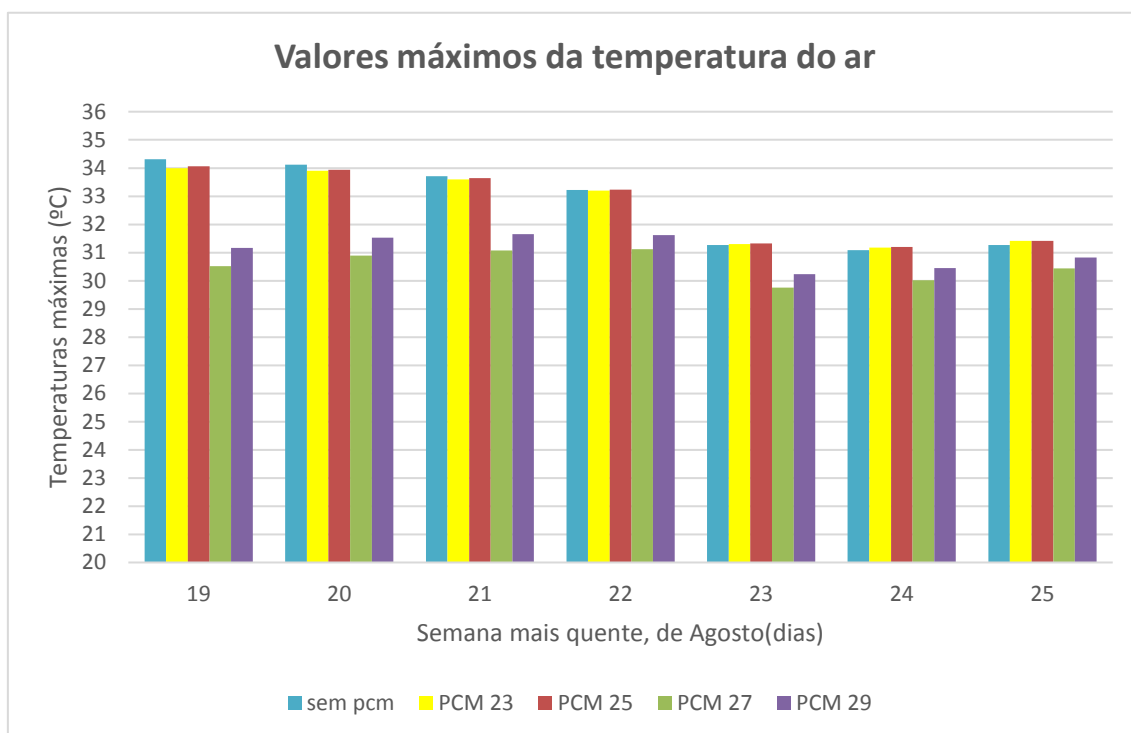
**Figura 6.16 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Porto.**

- **Évora**

Uma análise atenta aos gráficos na Figura 6.17 e Figura 6.18, permite concluir que apenas os PCM 27 e PCM 29 apresentam uma diferença nos picos de temperatura máximos atingidos, destacando uma diminuição de 3.79°C com a aplicação de PCM 27 face à opção sem PCM, no dia 19. É possível concluir que devido às elevadas temperaturas, e como se afastam bastante do ponto de fusão do PCM 23 e PCM 25, estes não são eficazes, não conseguindo completar os ciclos de fusão/solidificação., nomeadamente nos dias 19,20 e 21, quando as temperaturas são um pouco mais baixas, o PCM 27 e PCM 29 não são tão eficientes, o que pode ser explicado pela aproximação do ponto de fusão dos PCMs em questão, não completando os ciclos de fusão/solidificação.



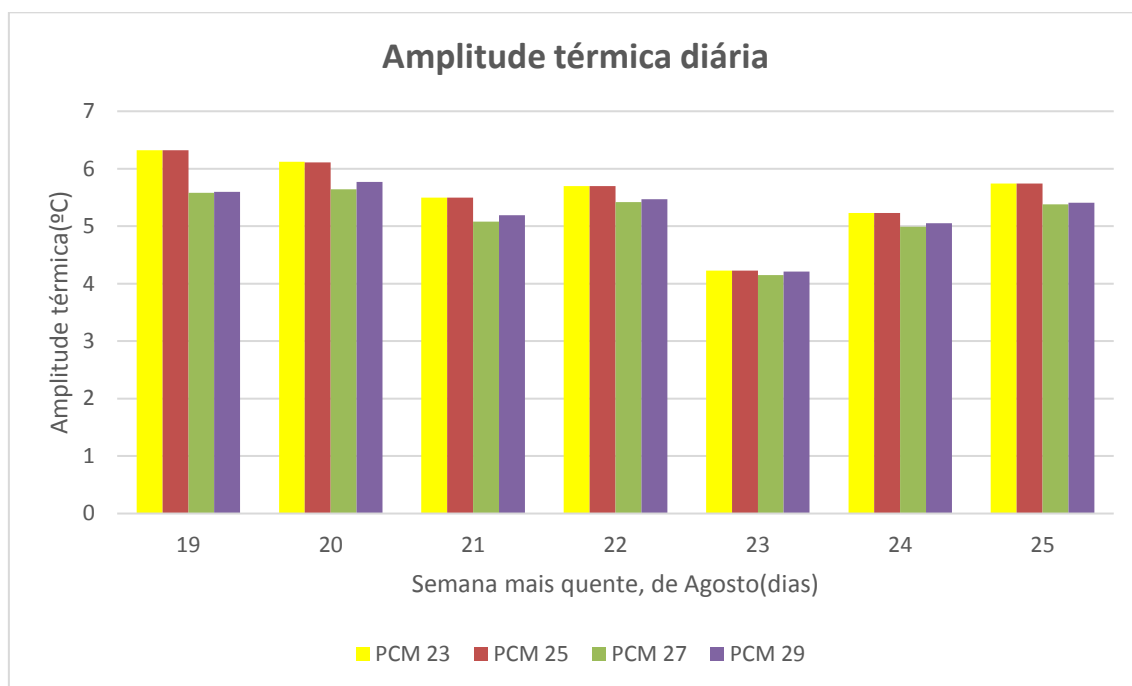
**Figura 6.17 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 19-25 Agosto, em Évora.**



**Figura 6.18 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Évora.**

Pela análise da Figura 6.19 podemos concluir que o PCM 27 e PCM 29 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo que

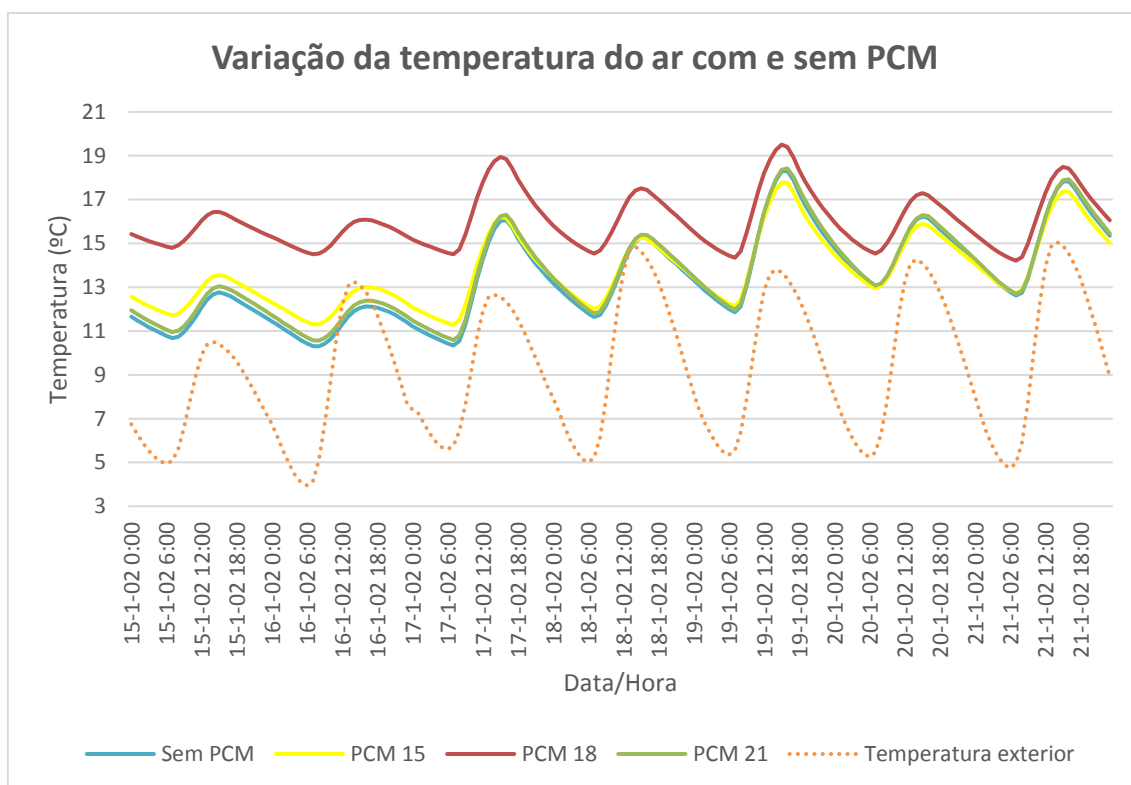
o PCM 23 e PCM 25 são ineficazes, como demonstrado. Dessa forma, a aplicação de PCM 27 será a opção mais vantajosa, para o presente caso de estudo, em Évora, considerando apenas ventilação natural.



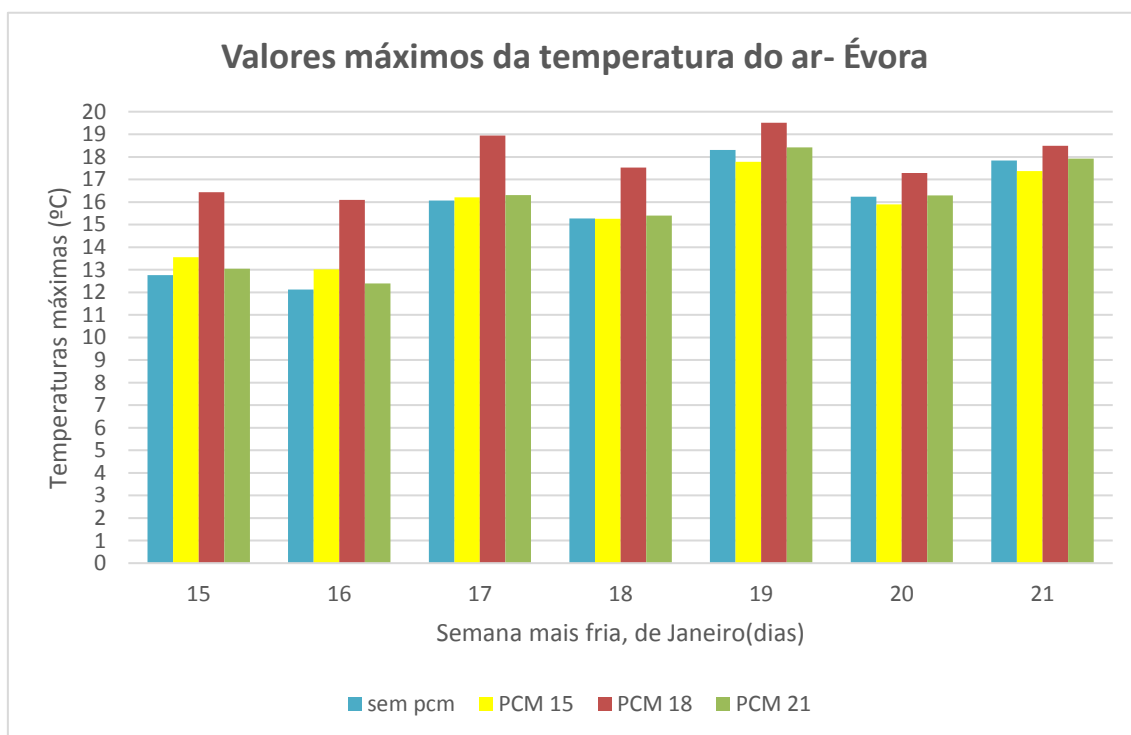
**Figura 6.19 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Évora.**

De seguida, é apresentada a análise para a semana mais fria, considerando PCM com temperaturas de fusão mais baixas (15°C, 18°C e 21°C).

Pela análise da Figura 6.20 e Figura 6.21, permite concluir que o PCM 18 apresenta o melhor desempenho ao longo de toda a semana. De salientar que o funcionamento do PCM 21 é praticamente nulo, o que podrá ser justificado pelas baixas temperaturas e radiação solar, como é visível na Figura A.7. É possível concluir que à medida que a temperatura se afasta do ponto de fusão do PCM 21, este deixa de ser eficiente, uma vez que não completa os ciclos de fusão/solidificação. De referir o aumento de 3.68 °C no dia 15 por parte do PCM 18, face à solução sem PCM.



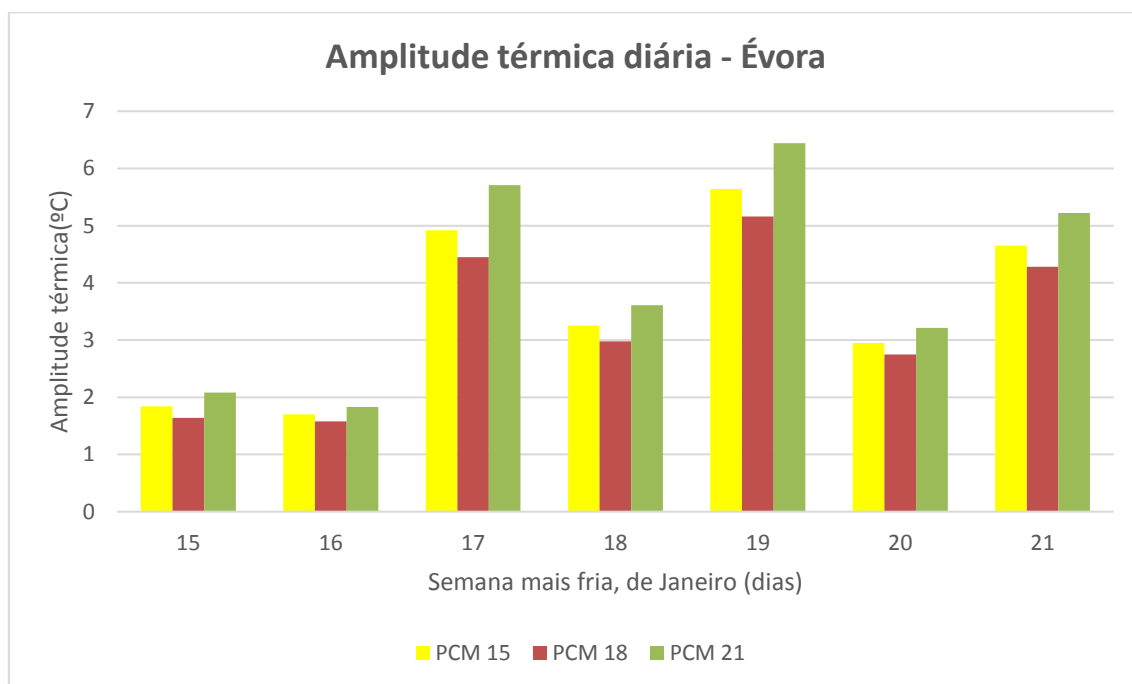
**Figura 6.20 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 15-21 Janeiro, em Évora.**



**Figura 6.21 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Évora.**

Pela análise da Figura 6.22 podemos concluir que o PCM 15 e PCM 18 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o

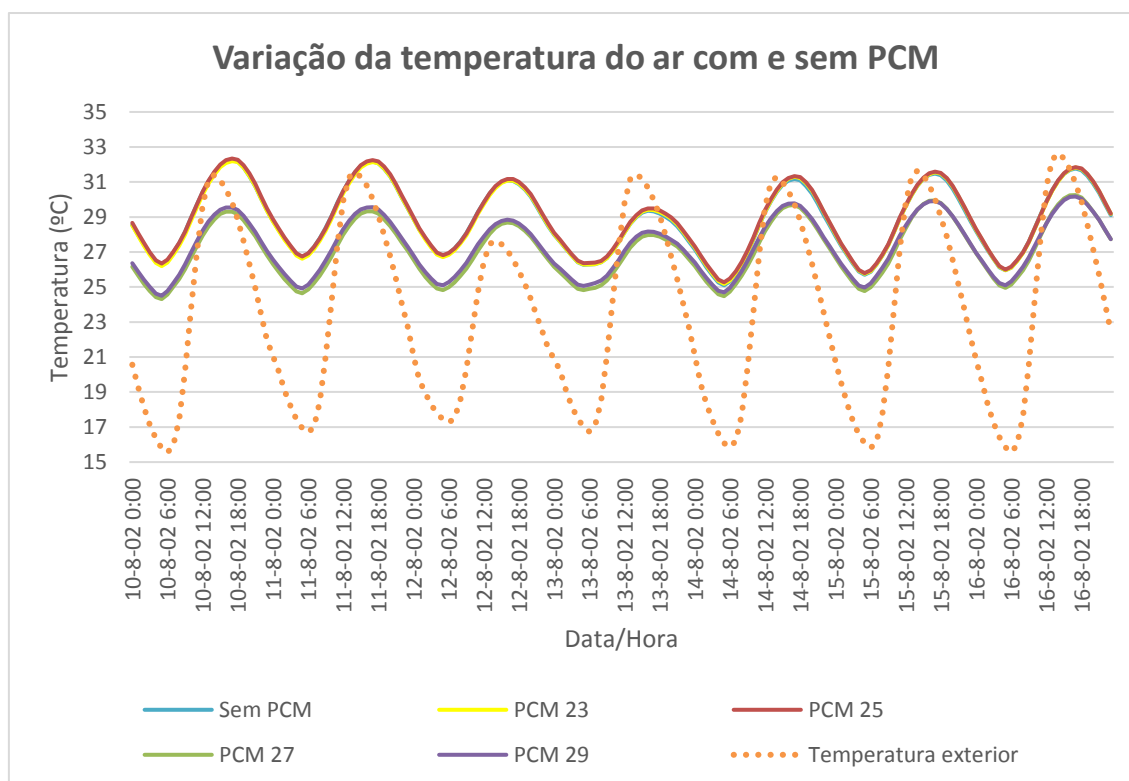
PCM 21 o mais desfavorável. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, na estação de aquecimento, em condições críticas, será com a introdução do PCM 18, atendendo o seu bom funcionamento ao longo de toda a semana.



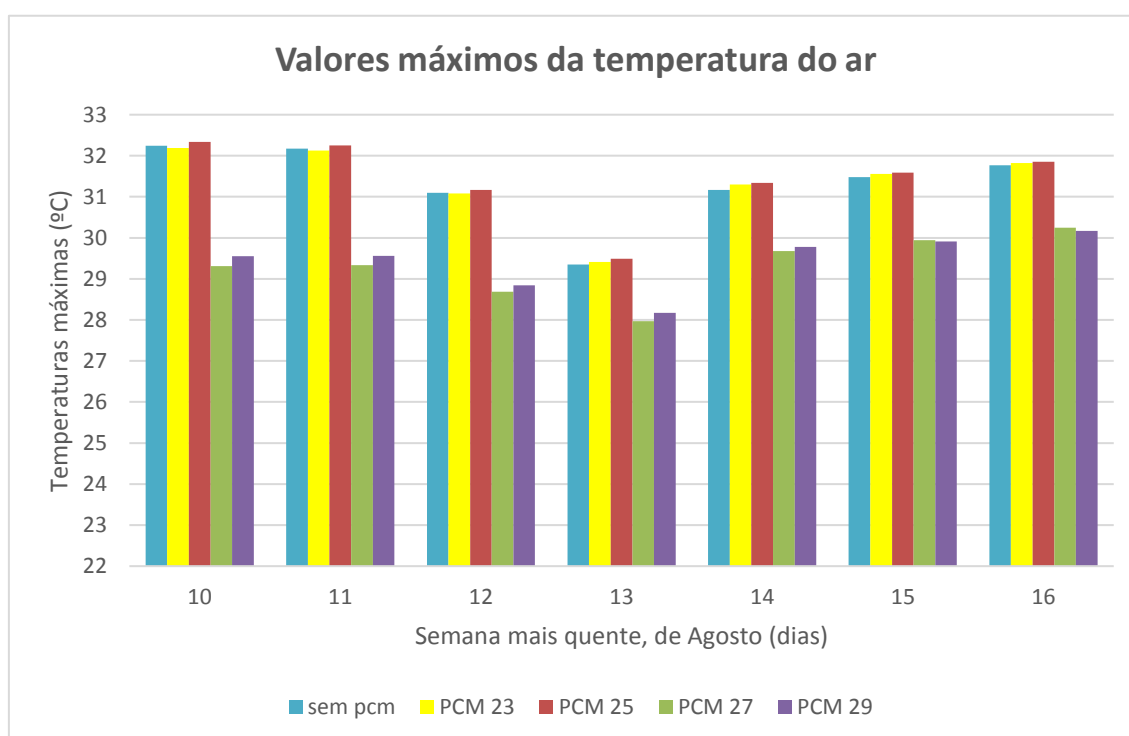
**Figura 6.22 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Évora.**

- **Viseu**

Uma análise atenta aos gráficos na Figura 6.23 e Figura 6.24, permite concluir que apenas os PCM 27 e PCM 29 apresentam uma diferença nos picos de temperatura máximos atingidos, destacando uma diminuição de 2.93°C com a aplicação de PCM 27 face à opção sem PCM, no dia 10. É possível concluir que devido às elevadas temperaturas, e como se afastam bastante do ponto de fusão do PCM 23 e PCM 25, estes não são eficazes, não conseguindo completar os ciclos de fusão/solificação., visível ao longo de toda a semana.



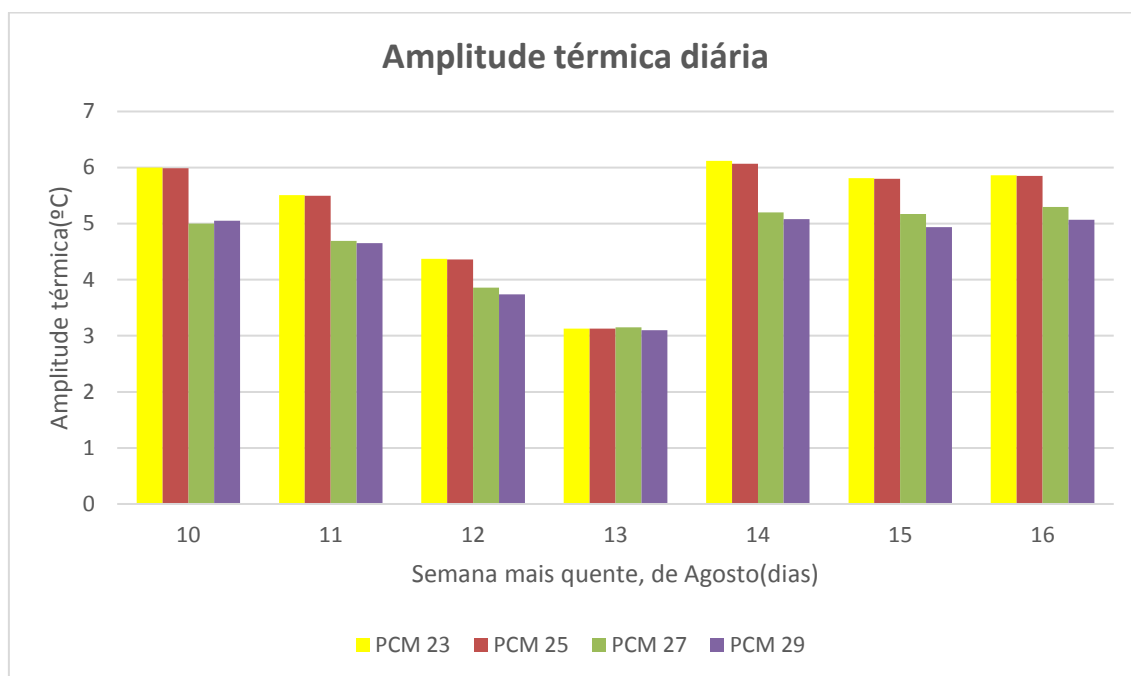
**Figura 6.23 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 10-16 Agosto, em Viseu.**



**Figura 6.24 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Viseu.**

Pela análise da Figura 6.25 podemos concluir que o PCM 27 e PCM 29 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o

PCM 23 e 25 os mais desfavoráveis. Este facto é facilmente justificável pelas altas temperaturas interiores verificadas. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, para o presente caso de estudo, em Viseu, considerando apenas ventilação natural, será a introdução de PCM 27.

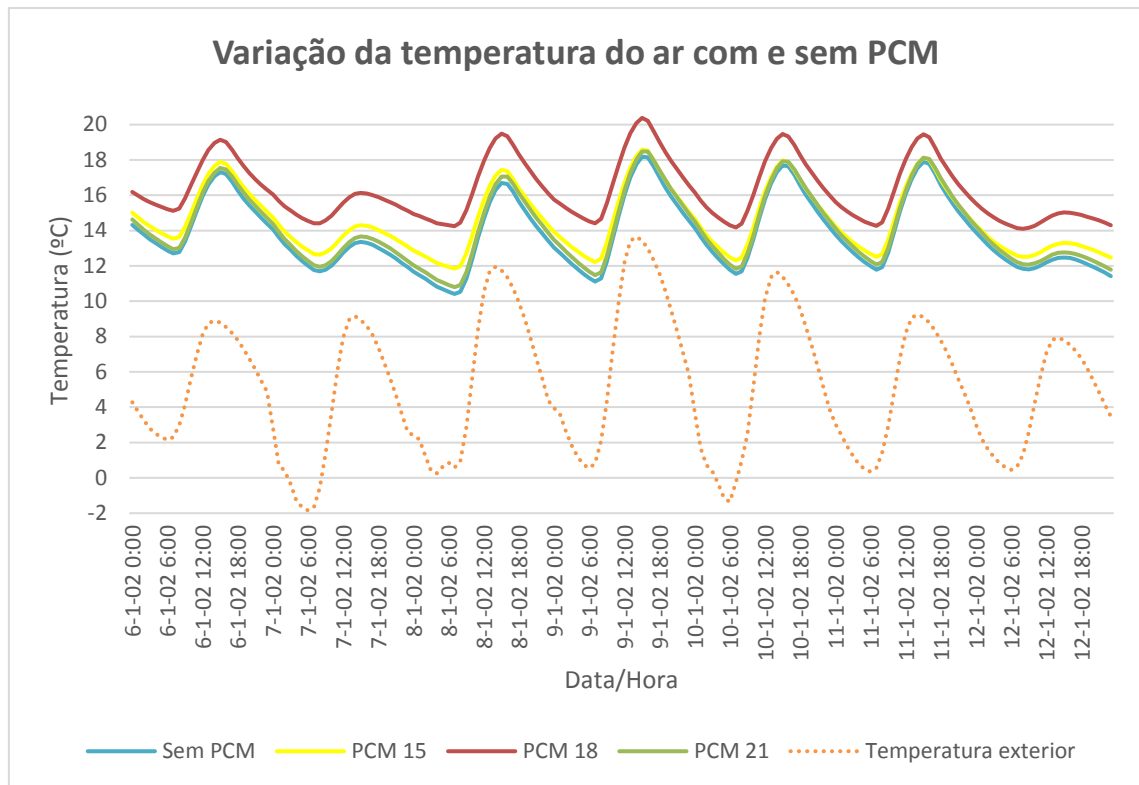


**Figura 6.25 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Viseu.**

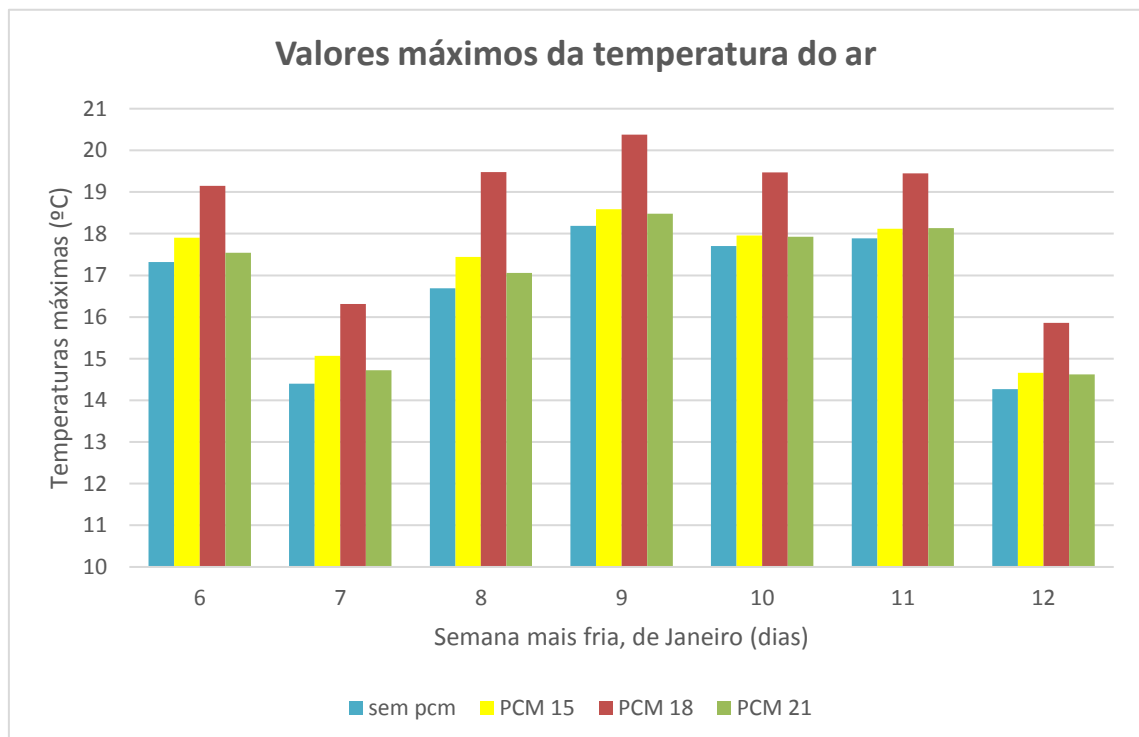
De seguida, é apresentada a análise para a semana mais fria, considerando PCM com temperaturas de fusão mais baixas (15°C, 18°C e 21°C).

Pela análise da Figura 6.26 e Figura 6.27, permite concluir que o PCM 15 e PCM 18 apresentam o melhor desempenho, sendo que se destaca o PCM 18 de uma forma geral em todos os dias da semana. Por outro lado o PCM 21 não apresenta resultados satisfatórios, sendo que o seu desempenho é praticamente nulo. Este facto poderá ser justificado em grande parte pela sua temperatura de fusão, de 21°C, estar bastante acima da temperatura do ar do edifício, como também não permanecer tempo suficiente na zona de ação deste PCM, sendo que dessa forma não completa os ciclos de fusão/solidificação. De referir o aumento de 2.79 °C no dia 8 por parte do PCM 18, face à solução sem PCM.



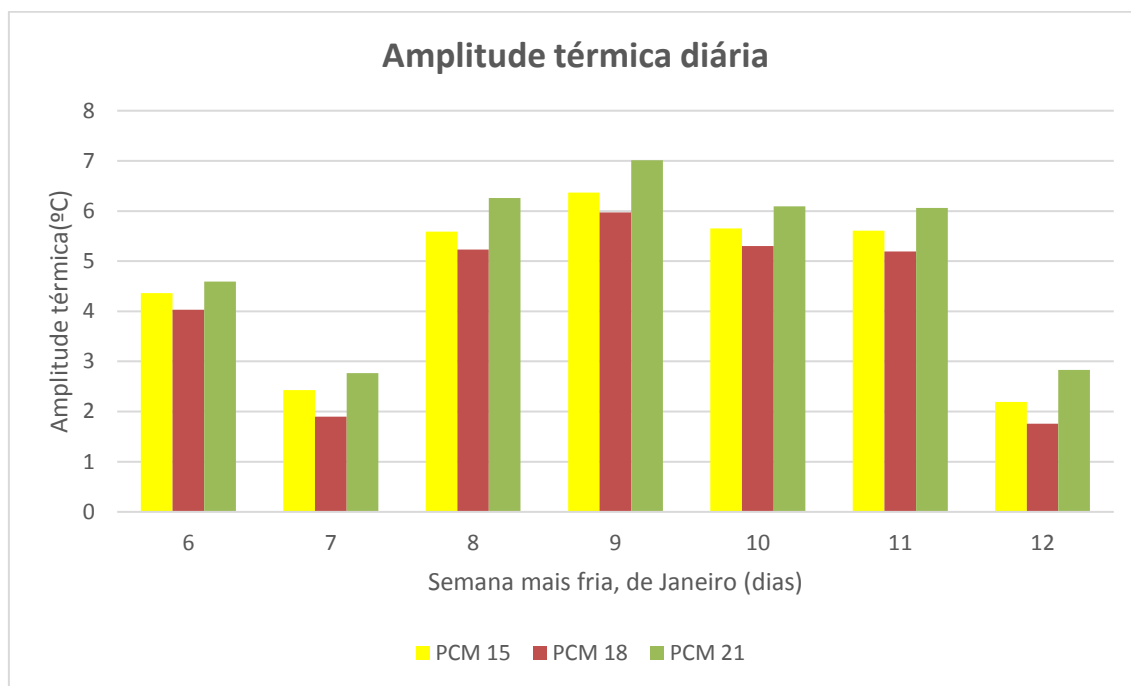


**Figura 6.26 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 06-12 Janeiro, em Viseu.**



**Figura 6.27 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Viseu.**

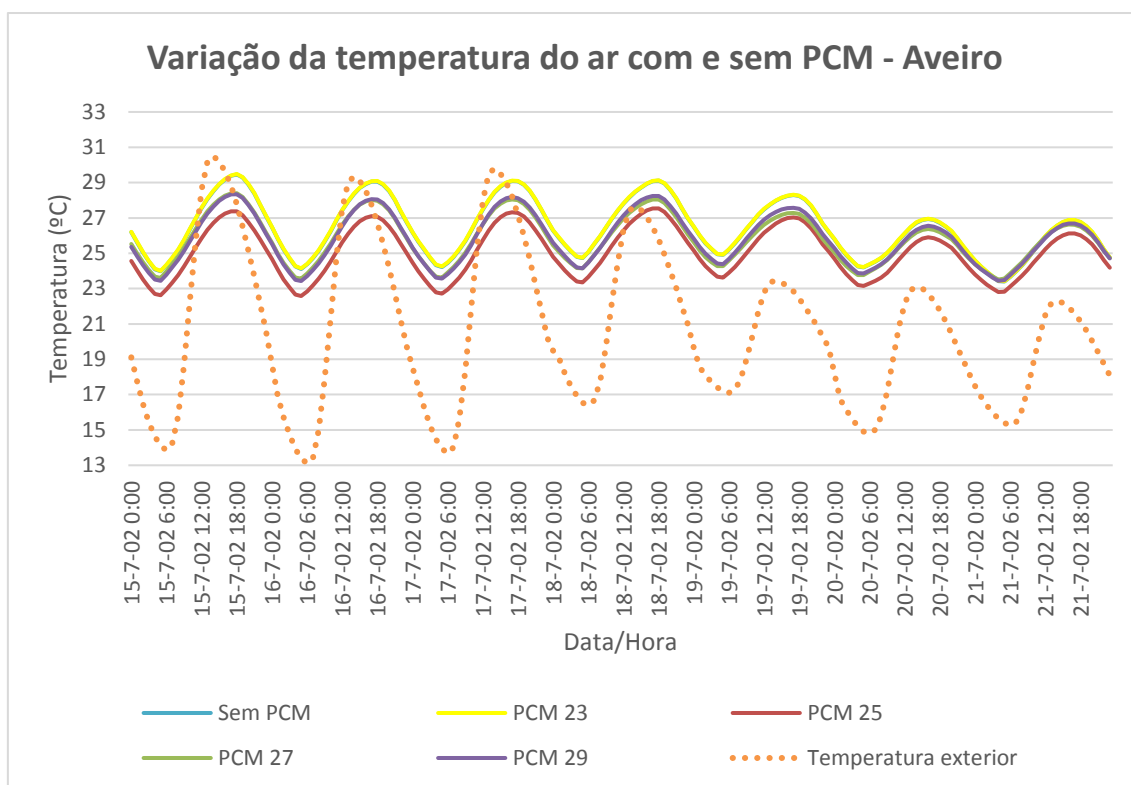
Pela análise da Figura 6.28 podemos concluir que o PCM 18 é aquele que possui uma menor amplitude térmica ao longo de toda a semana, demonstrando ser mais eficiente, sendo o PCM 21 o mais desfavorável. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, na estação de aquecimento, em condições críticas, será com a introdução do PCM 18.



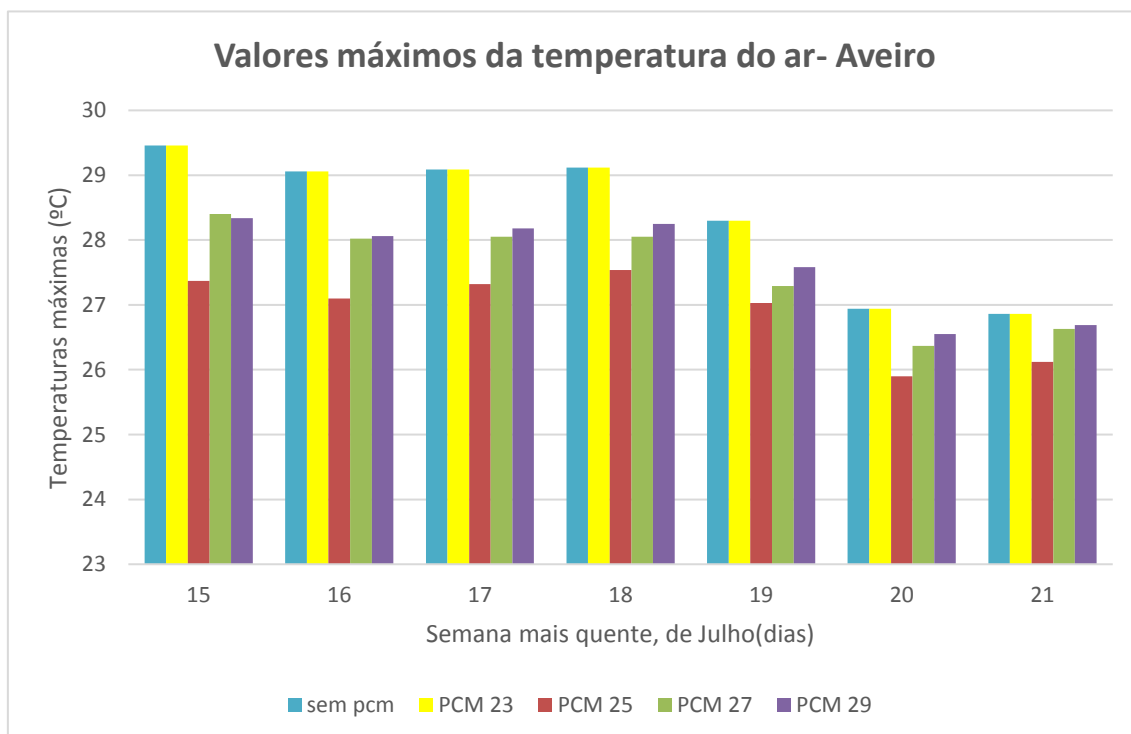
**Figura 6.28 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Viseu.**

- **Aveiro**

Uma análise atenta aos gráficos na Figura 6.29 e Figura 6.30, permite concluir que todos os PCM aplicados, em exceção do PCM 23, apresentam uma diferença nos picos de temperatura máximos atingidos, sendo que no dia de pico de temperatura máxima (dia 15 de Julho), o PCM 25 e PCM 27 assumem os melhores resultados em termos de redução da temperatura máxima, destacando uma diminuição de 2.09°C com a aplicação de PCM 25 face à opção sem PCM. De referir que o PCM 23 teve um efeito praticamente nulo, que pode ser justificado pela sua temperatura de fusão, de 23°C, estar bastante abaixo da temperatura do ar do edifício, sendo que dessa forma não completa os ciclos de fusão/solidificação.

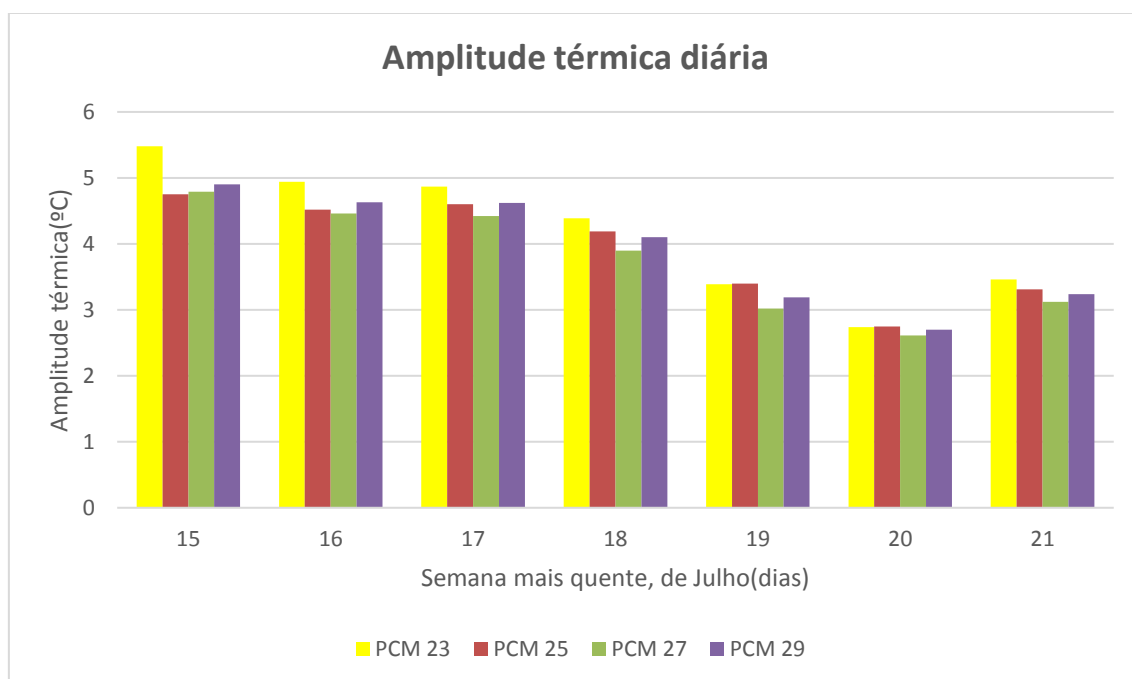


**Figura 6.29 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 15-21 Julho, em Aveiro.**



**Figura 6.30 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Aveiro.**

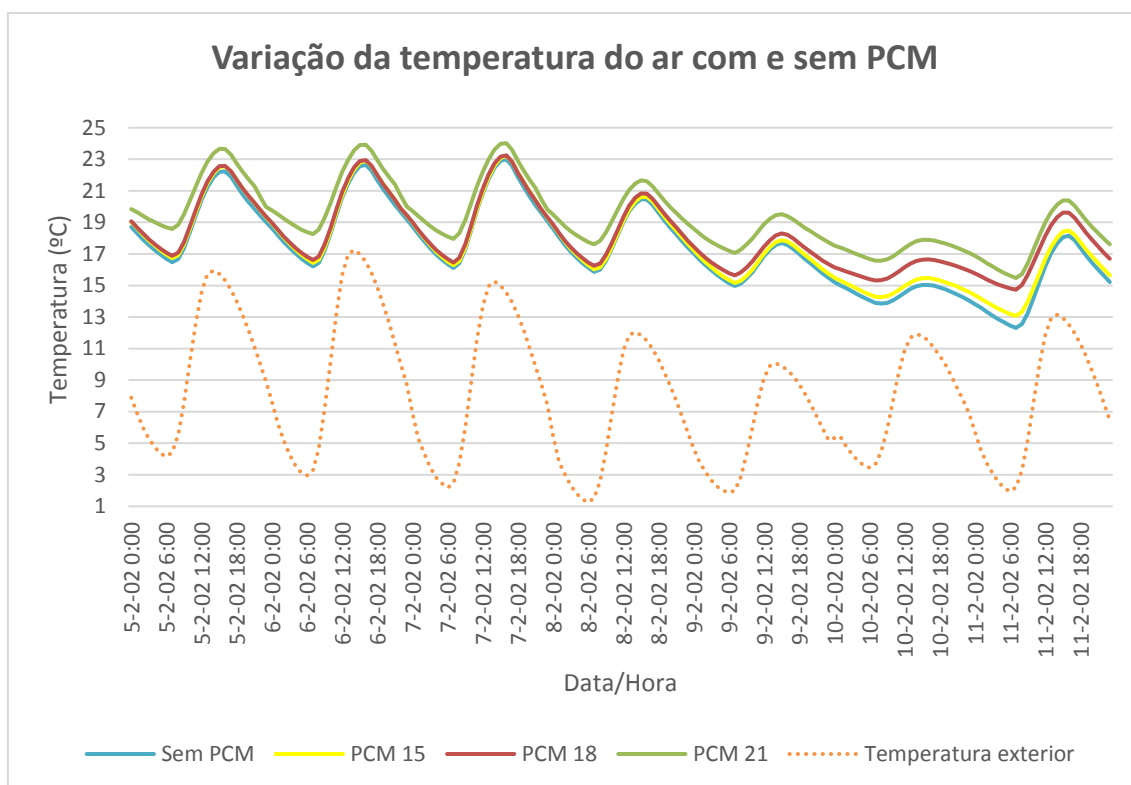
Pela análise da Figura 6.31 podemos concluir que o PCM 27 é aquele que demonstra ser mais eficiente, apresentando uma menor amplitude térmica em todos os dias, sendo o PCM 23 o mais desfavorável. Apesar disso, o PCM 25 é aquele que assume melhor desempenho em aproximar da zona de conforto térmico e por isso será a opção mais vantajosa, para o presente caso de estudo, em Aveiro, em condições críticas, considerando apenas ventilação natural.



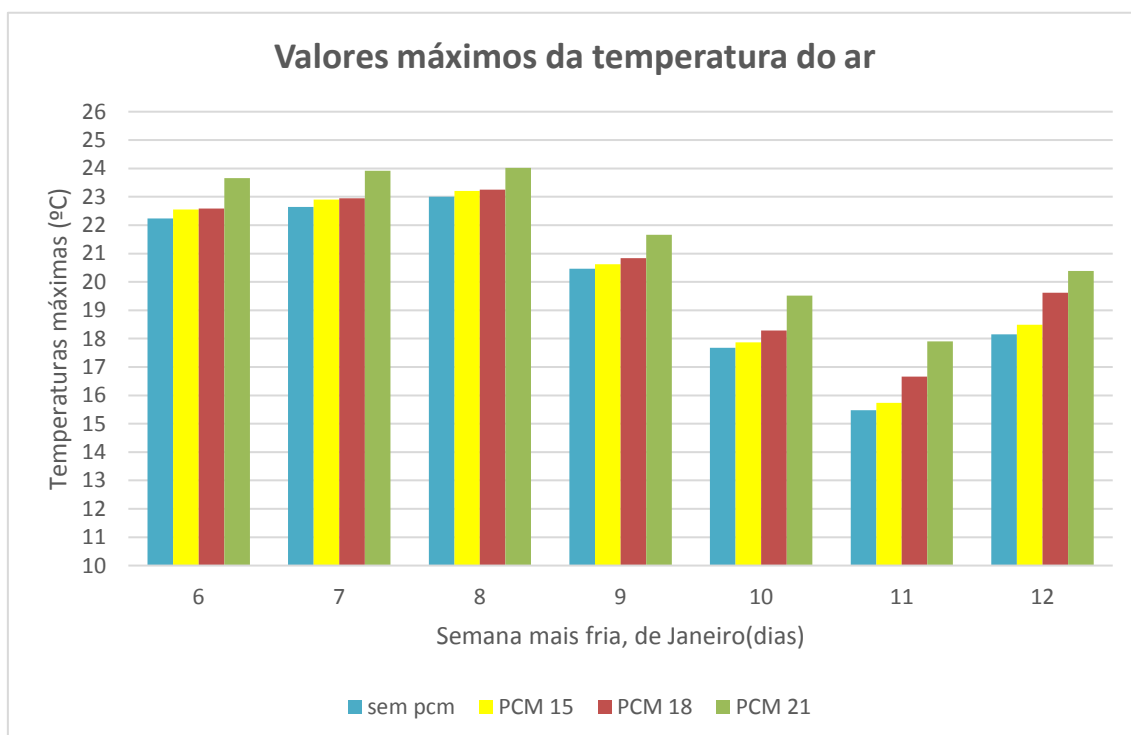
**Figura 6.31 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Aveiro.**

De seguida, é apresentada a análise para a semana mais fria, considerando PCM com temperaturas de fusão mais baixas (15°C, 18°C e 21°C).

Pela análise da Figura 6.32 e Figura 6.33, permite concluir que o PCM 18 e PCM 21 apresentam o melhor desempenho, sendo que se destaca o PCM 21 de uma forma geral em todos os dias da semana. De referir o aumento de 1.42 °C no dia 05 por parte do PCM 21, face à solução sem PCM.



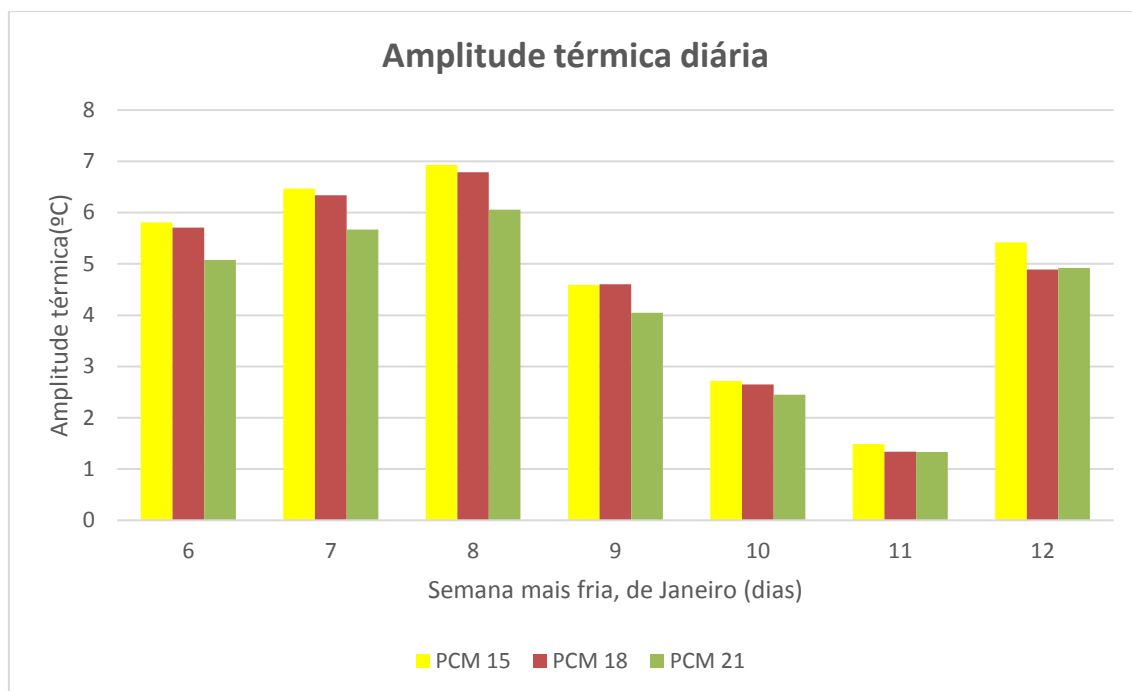
**Figura 6.32 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 05-11 Fevereiro, em Aveiro.**



**Figura 6.33 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Aveiro.**

Pela análise da Figura 6.34 podemos concluir que o PCM 18 e PCM 21 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o

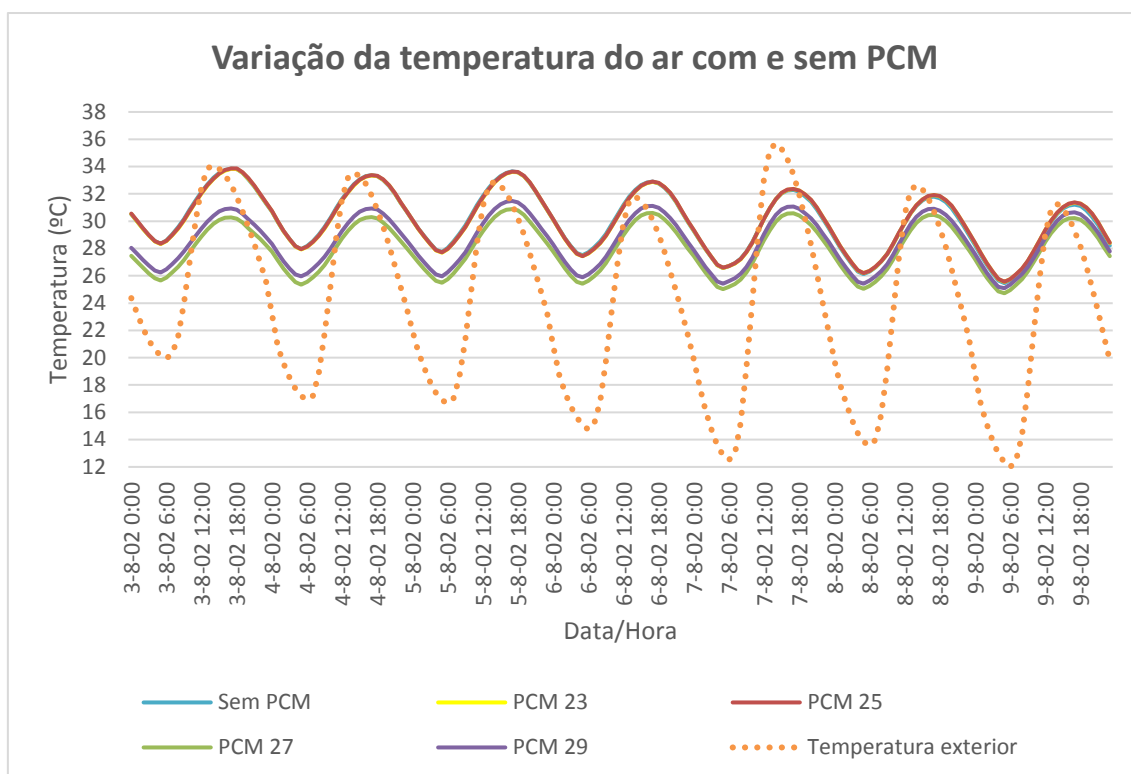
PCM 15 o mais desfavorável. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, na estação de aquecimento, em condições críticas, será com a introdução do PCM 21.



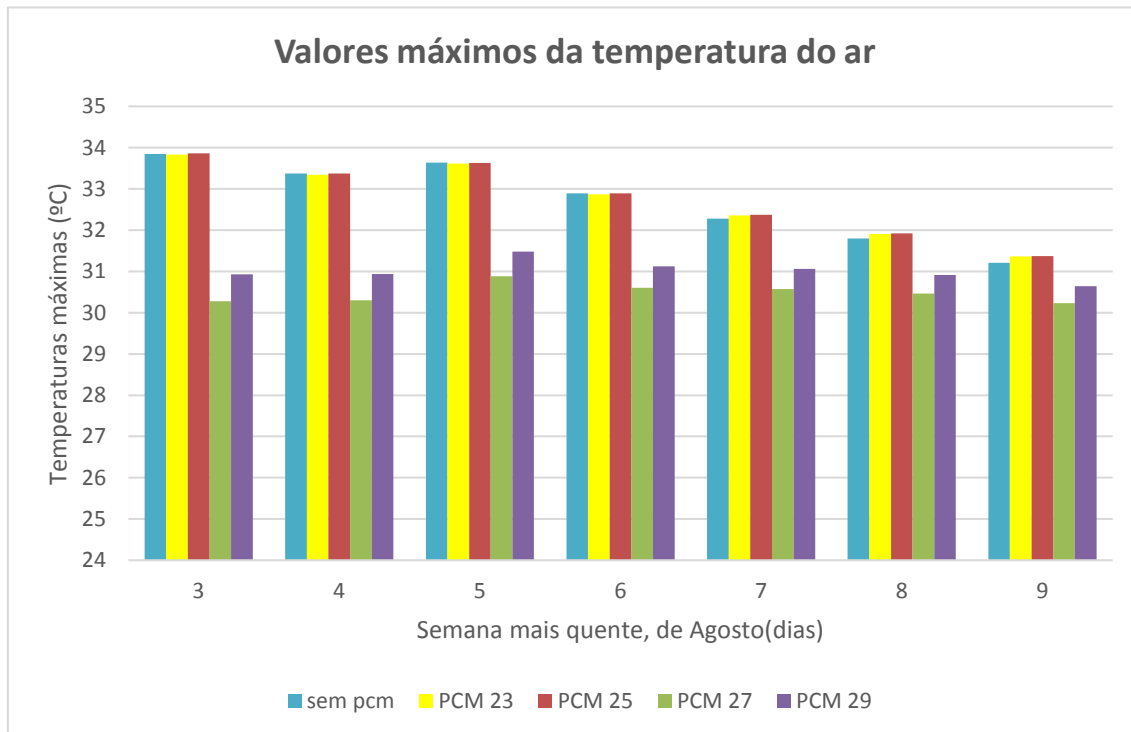
**Figura 6.34 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Aveiro.**

- **Lamego**

Uma análise atenta aos gráficos na Figura 6.35 e Figura 6.36, permite concluir que o PCM 23 e 25 provaram ser ineficazes face à temperatura elevada verificada ao longo de toda a semana, sendo que PCM 27 e PCM 29 assumem os melhores resultados em termos de redução da temperatura máxima. De referir a diminuição de 3.57°C com aplicação de PCM 27 face à solução sem PCM no dia de maior temperatura, dia 3.

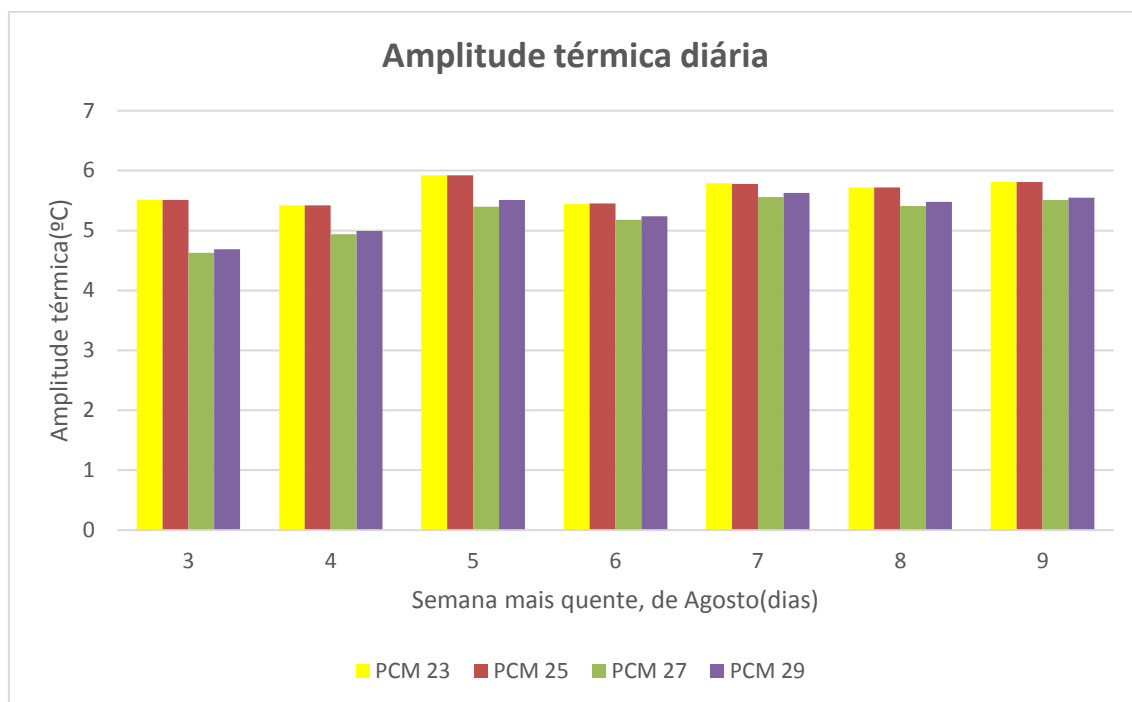


**Figura 6.35 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 03-09 Agosto, em Lamego.**



**Figura 6.36 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Lamego.**

Pela análise da Figura 6.37 podemos concluir que o PCM 27 e PCM 29 são aqueles que demonstram ser mais eficientes, apresentando uma menor amplitude térmica em todos os dias, sendo o PCM 23 e 25 os mais desfavoráveis. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, para o presente caso de estudo, em Lamego, considerando apenas ventilação natural, em condições críticas, será a introdução de PCM 27.

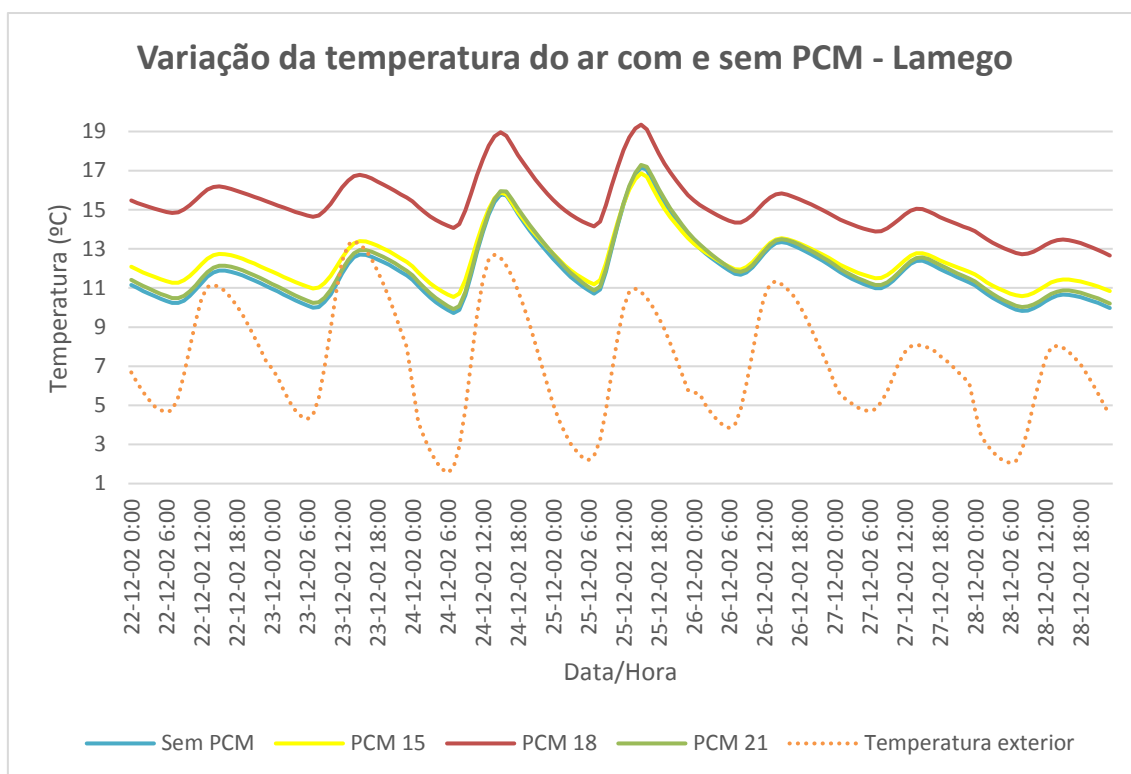


**Figura 6.37 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Lamego.**

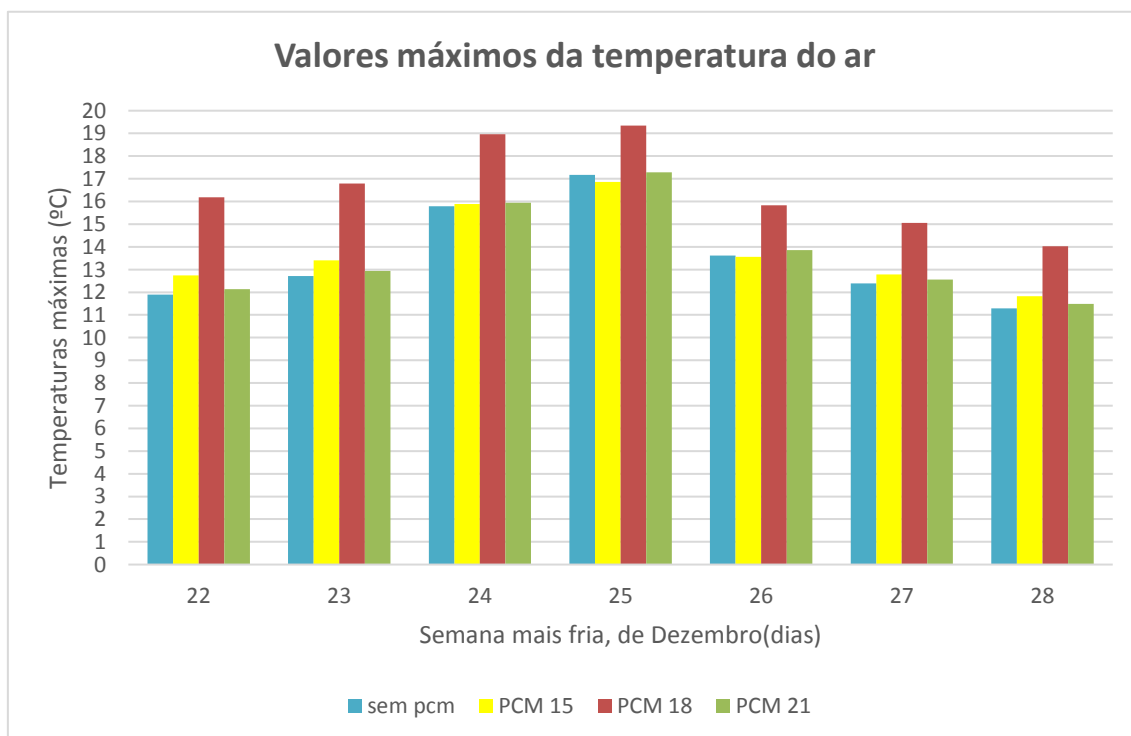
De seguida, é apresentada a análise para a semana mais fria, considerando PCM com temperaturas de fusão mais baixas (15°C, 18°C e 21°C).

Pela análise da Figura 6.38 e Figura 6.39, permite concluir que o PCM 15 e PCM 18 apresentam o melhor desempenho, sendo que se destaca o PCM 18 de uma forma geral em todos os dias da semana. Por outro lado o PCM 21 não apresenta resultados satisfatórios, sendo que o seu desempenho é praticamente nulo. Este facto poderá ser justificado em grande parte pela sua temperatura de fusão, de 21°C, estar bastante acima da temperatura do ar do edifício, sendo que dessa forma não completa os ciclos de fusão/solidificação. De referir também que a radiação solar é bastante reduzida ao longo desta semana, como é perceptível na Figura A.7.





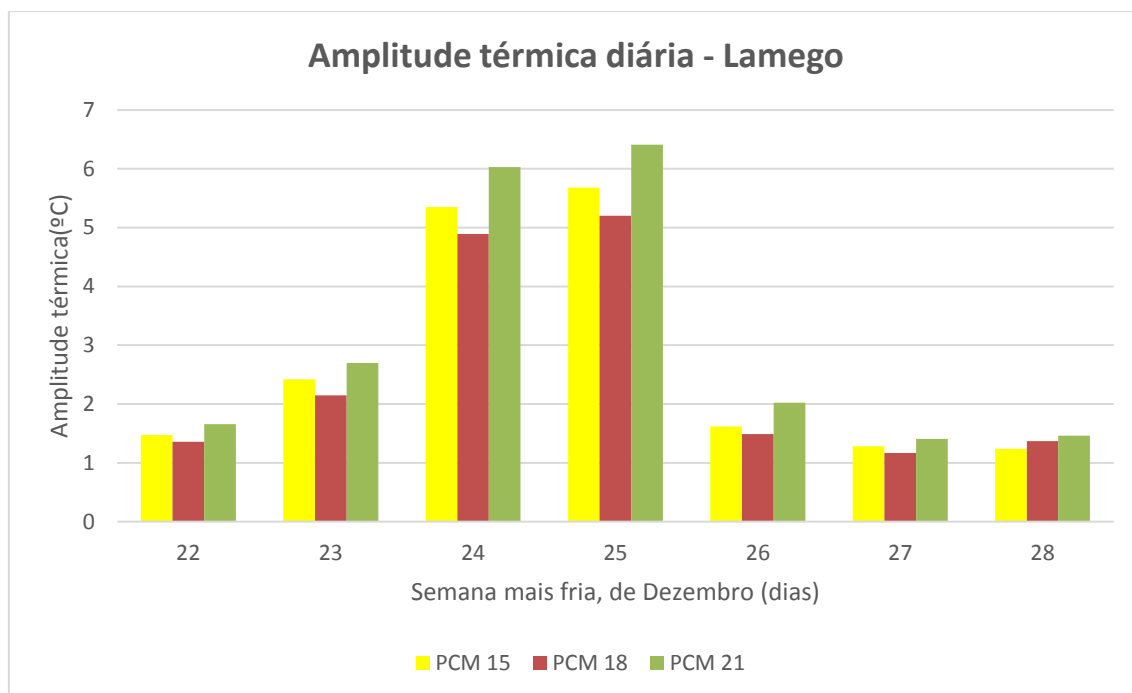
**Figura 6.38 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 22-28 Janeiro, em Lamego.**



**Figura 6.39 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Lamego.**

Pela análise da Figura 6.40 podemos concluir que o PCM 15 e PCM 18 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o

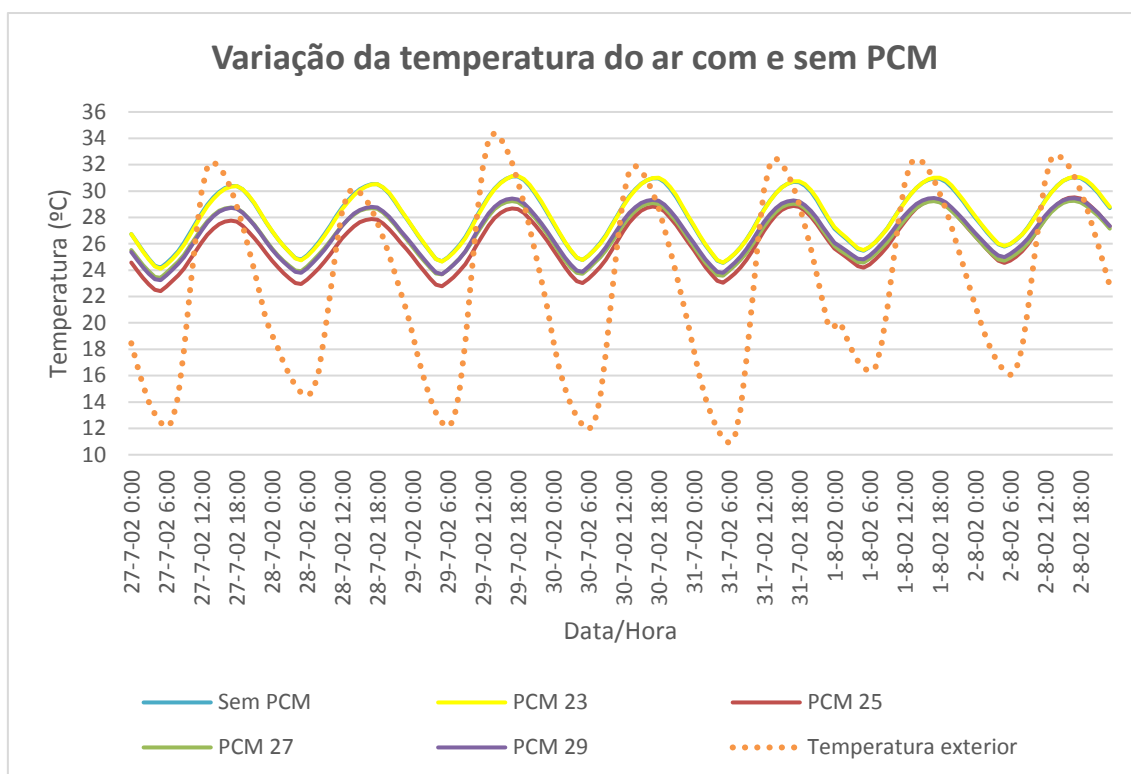
PCM 21 o mais desfavorável. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, na estação de aquecimento, em condições críticas, será com a introdução do PCM 18.



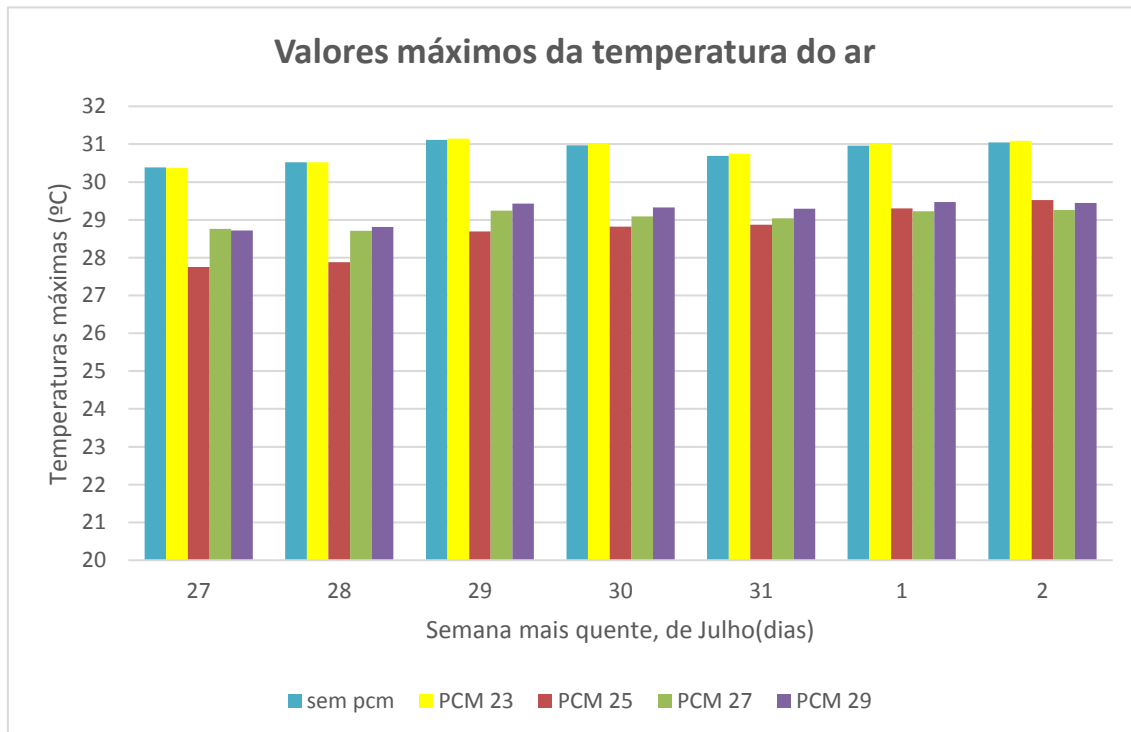
**Figura 6.40 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Lamego.**

- **Bragança**

Uma análise atenta aos gráficos na Figura 6.41 e Figura 6.42, permite concluir que o PCM 23 provou ser ineficaz face à temperatura elevada verificada ao longo de toda a semana, sendo que PCM 25 assume os melhores resultados em termos de redução da temperatura máxima na medida de aproximar da temperatura de conforto, verificando-se uma redução de 2.64°C no dia 27.

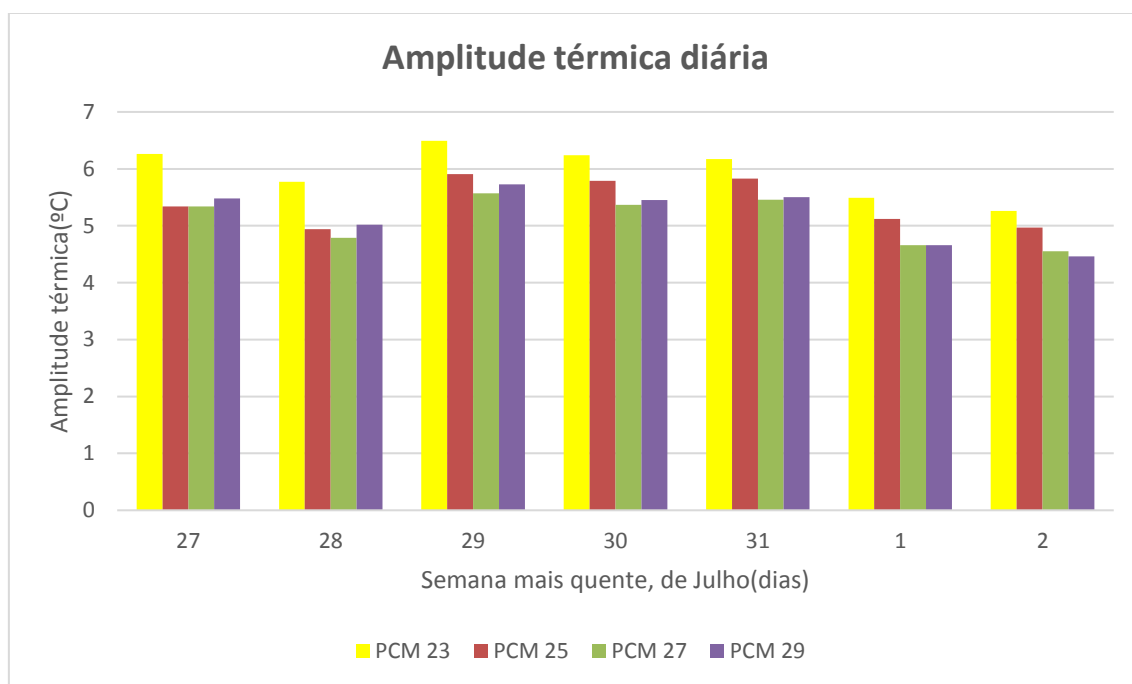


**Figura 6.41 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais quente, 27-02 Julho/Agosto, em Bragança.**



**Figura 6.42 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais quente, com e sem PCM, em Bragança.**

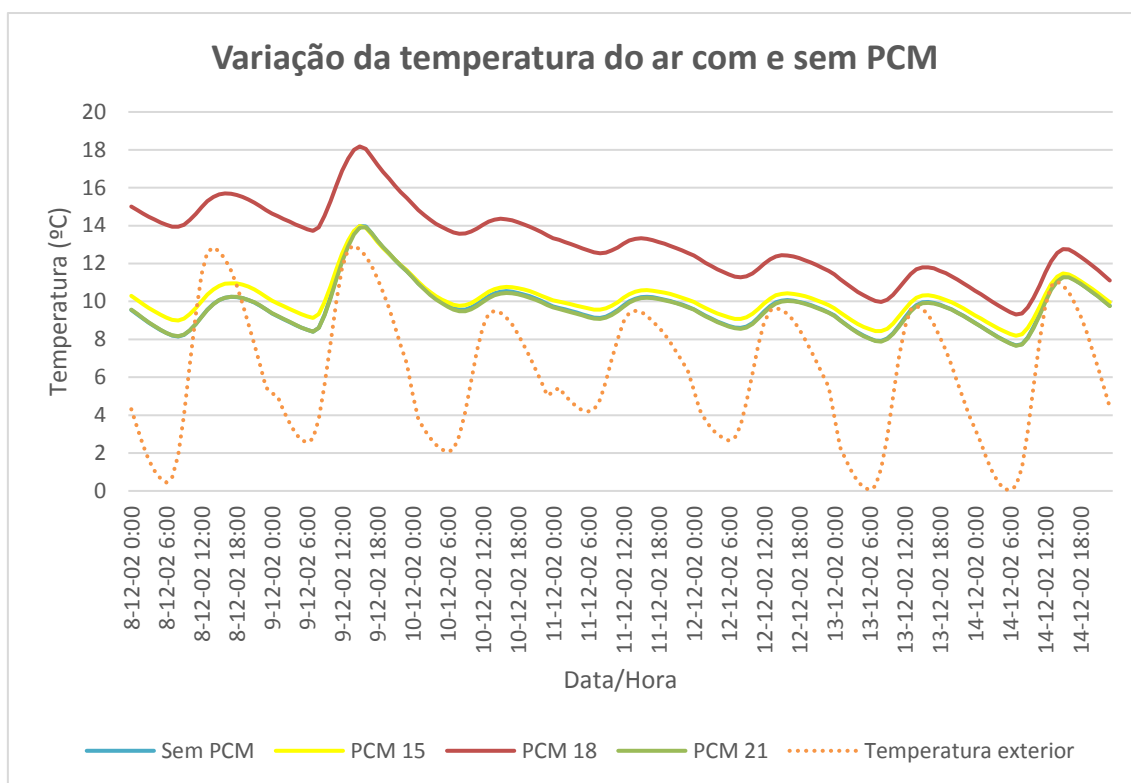
Pela análise da Figura 6.43 podemos concluir que o PCM 27 e PCM 29 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o PCM 23 o mais desfavorável. Apesar disso, o PCM 25 é aquele que assume melhor desempenho em aproximar da zona de conforto térmico e por isso será a opção mais vantajosa, para o presente caso de estudo, em Bragança, em condições críticas, considerando apenas ventilação natural.



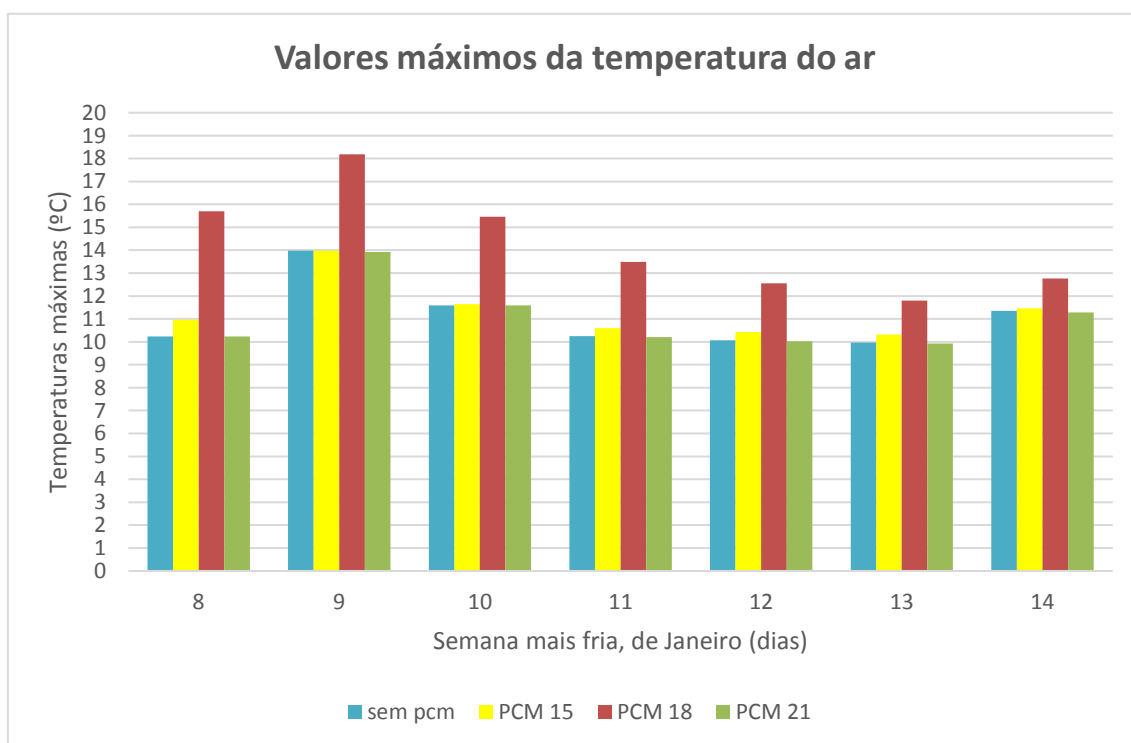
**Figura 6.43 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais quente, em Bragança.**

De seguida, é apresentada a análise para a semana mais fria, considerando PCM com temperaturas de fusão mais baixas (15°C, 18°C e 21°C).

Pela análise da Figura 6.44 e Figura 6.45, permite concluir que o PCM 15 e PCM 18 apresentam o melhor desempenho, sendo que se destaca o PCM 18 de uma forma geral em todos os dias da semana. Por outro lado o PCM 21 não apresenta resultados satisfatórios, sendo que o seu desempenho é praticamente nulo. Este facto poderá ser justificado em grande parte pela sua temperatura de fusão, de 21°C, estar bastante acima da temperatura do ar do edifício, sendo que dessa forma não completa os ciclos de fusão/solidificação. De referir também que a radiação solar é bastante reduzida ao longo desta semana, como é perceptível na Figura A.7.



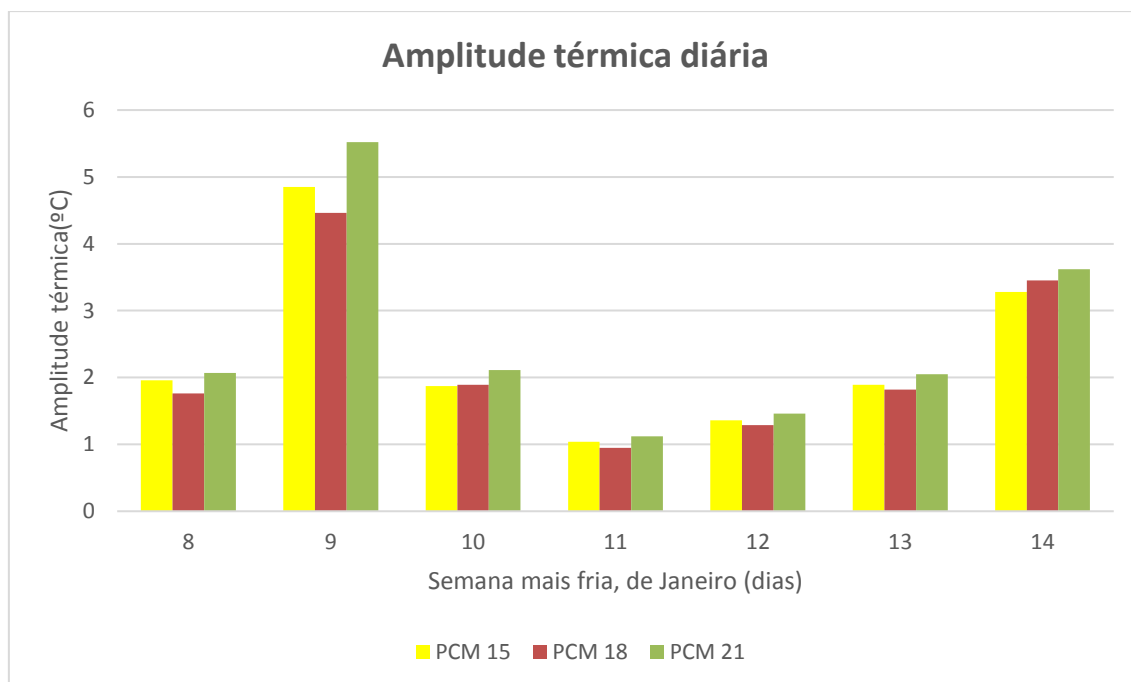
**Figura 6.44 - Variação da temperatura do ar com e sem PCM, ao longo da semana mais fria, 08-14 Dezembro, em Bragança.**



**Figura 6.45 - Valores máximos da temperatura do ar, por dia, durante a semana mais fria, com e sem PCM, em Bragança.**

Pela análise da Figura 6.46 podemos concluir que o PCM 15 e PCM 18 são aqueles que possuem uma menor amplitude térmica, demonstrando serem mais eficientes, sendo o

PCM 21 o mais desfavorável. Desta forma, conclui-se que a opção mais vantajosa, na estação de aquecimento, em condições críticas, será com a introdução do PCM 18.



**Figura 6.46 - Valores máximos de amplitude térmica diária, com aplicação dos diferentes PCM, durante a semana mais fria, em Bragança.**

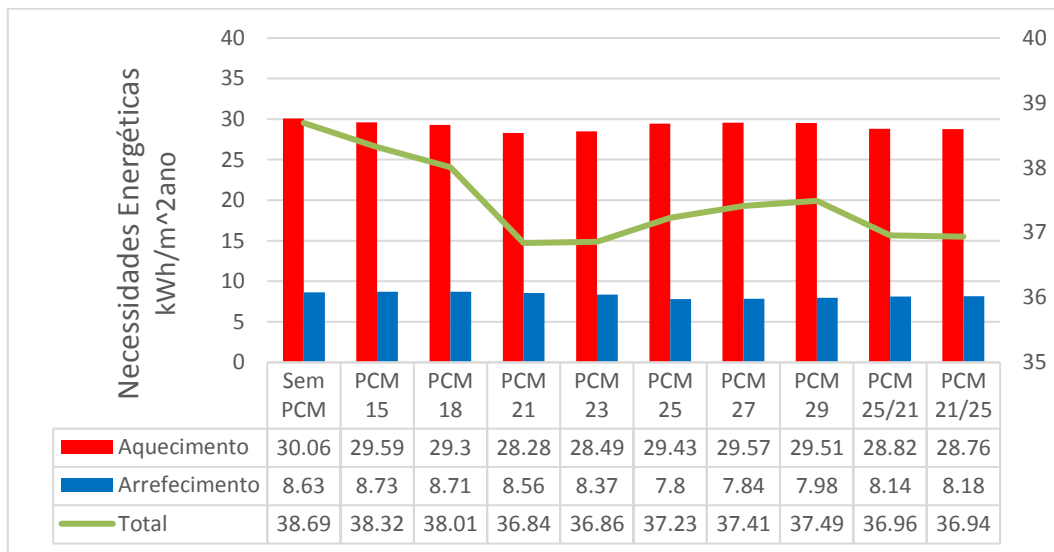
### 6.1.3 3ª fase de simulações

Terminada a 2ª fase de simulações, surge a necessidade de adoptar um novo critério para a seleção dos PCMs, uma vez o PCM com melhor desempenho na redução dos picos de temperatura e amplitude térmica, num período extremo de temperatura (*design week*), poderá não coincidir com a melhor solução na diminuição das necessidades de climatização anual. Dessa forma definiu-se um sistema de climatização, com uma eficiência de 100%, programado para manter as temperaturas interiores, nos períodos de ocupação das 18h às 8h, no intervalo de conforto entre 20°C e 25°C. Assim será possível comparar as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento com e sem PCM. Para além dos PCMs em estudo, com aplicação nas paredes exteriores e cobertura, foi também selecionado uma combinação, que seria a combinação do PCM que teve melhor desempenho na estação de aquecimento e o que teve melhor desempenho na estação de arrefecimento, podendo dessa forma otimizar uma solução. Para uma melhor compreensão quando a combinação está definida como PCM 23/21, significa que foi aplicado PCM 23 nas paredes e PCM 21 na cobertura, por sua vez caso seja PCM 21/23,

significará o oposto, sendo PCM 21 nas paredes e PCM 23 na cobertura. As necessidades energéticas são expressas em  $kWh/m^2ano$ .

- **Lisboa**

Pela análise da Figura 6.47 é possível verificar que, de uma forma geral, a aplicação de PCM 21, PCM 23 e PCM 25 são aqueles que apresentam um melhor desempenho em termos de necessidades energéticas anuais, destacando a solução com PCM 21, conseguindo obter uma redução de de  $1.85 kWh/m^2ano$ .

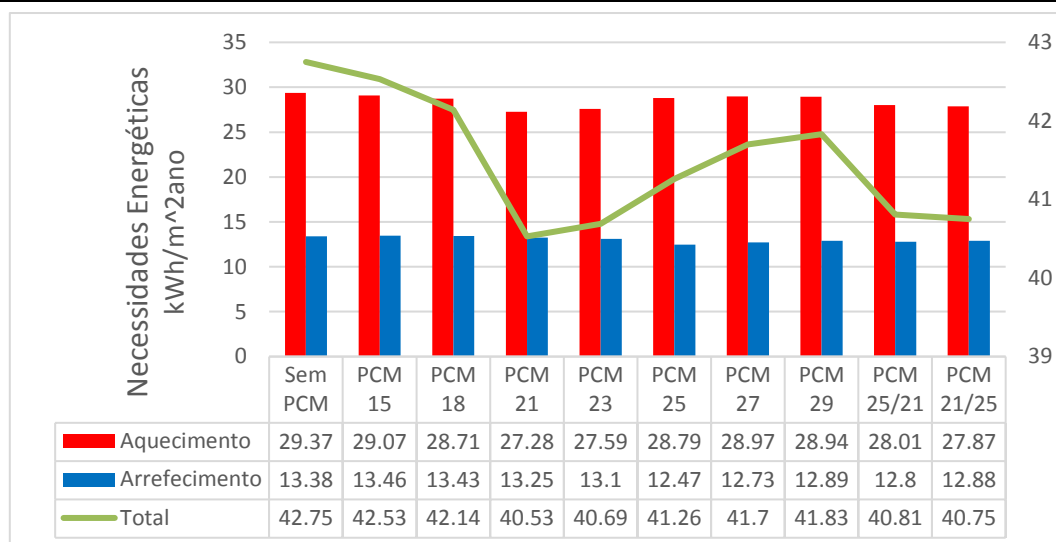


**Figura 6.47 – Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Lisboa.**

Apesar de escolhida uma combinação que combina o PCM com o menor valor das necessidades de aquecimento (PCM 21) e o o menor valor das necessidades de arrefecimento (PCM25), a combinação de PCM 21/21 apresenta-se como a melhor solução no que diz respeito às necessidades de climatização, muito devido ao facto de as necessidades de aquecimento serem predominantes nas necessidades totais. Para futuros cálculos será utilizado a combinação PCM 21/25 uma vez que abrange uma gama maior de temperaturas.

- **Porto**

Pela análise da Figura 6.48 é possível verificar que, de uma forma geral, a aplicação de PCM 21, PCM 23 e PCM 25 são aqueles que apresentam um melhor desempenho em termos de necessidades energéticas anuais, destacando a solução com PCM 21, conseguindo obter uma redução de  $2.22 kWh/m^2ano$ .

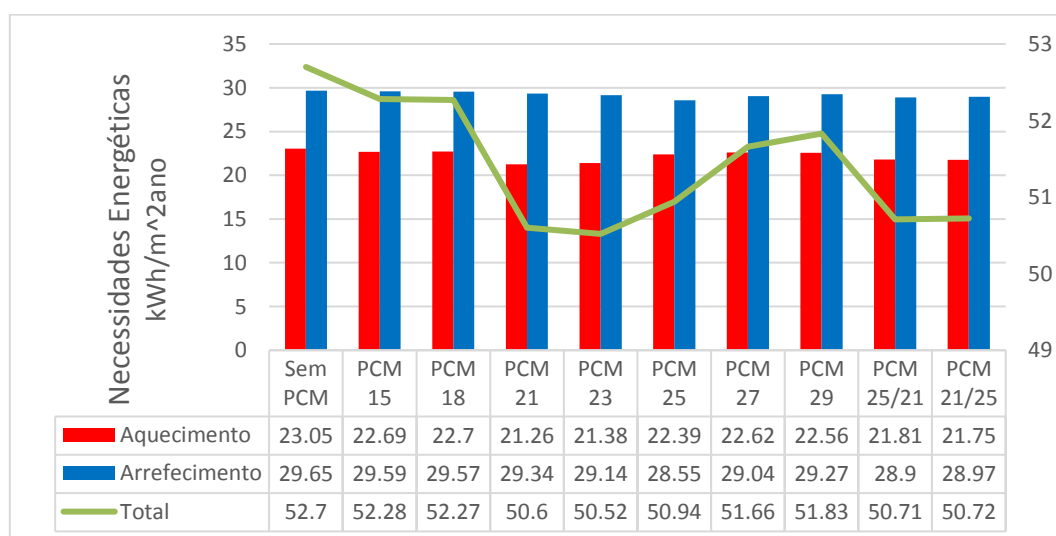


**Figura 6.48 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Porto.**

Apesar de escolhida uma combinação que combina o PCM com o menor valor das necessidades de aquecimento (PCM 21) e o menor valor das necessidades de arrefecimento (PCM 25), a combinação de PCM 21/21 apresenta-se como a melhor solução no que diz respeito às necessidades de climatização.

- Évora

Pela análise da Figura 6.49 é possível verificar que, de uma forma geral, a aplicação de PCM 21, PCM 23 e PCM 25 são aqueles que apresentam um melhor desempenho em termos de necessidades energéticas anuais, destacando a solução com PCM 23, conseguindo obter uma redução de  $2.18 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ .



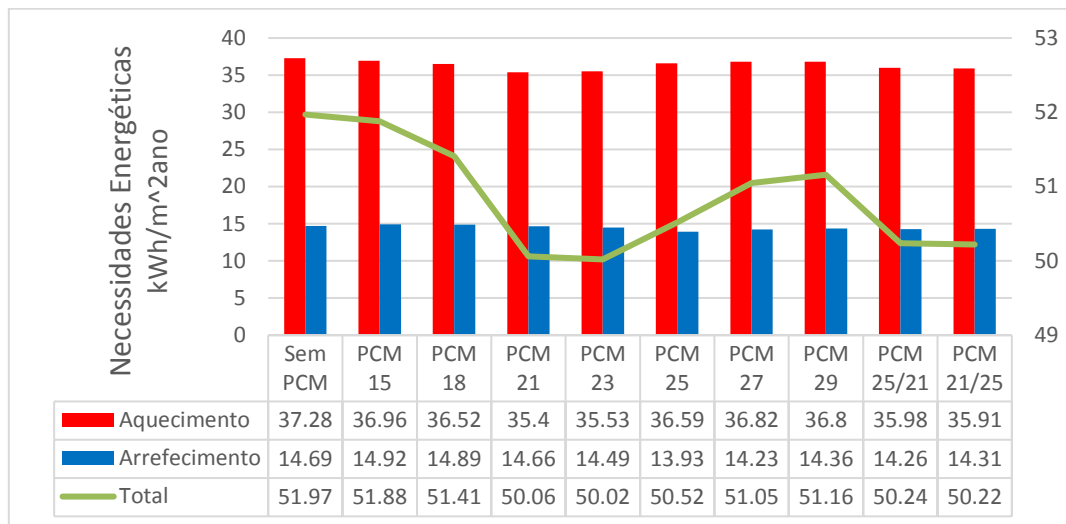
**Figura 6.49 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Évora.**



Apesar de escolhida uma combinação que combina o PCM com o menor valor das necessidades de aquecimento (PCM 21) e o menor valor das necessidades de arrefecimento (PCM 25), a combinação de PCM 23/23 apresenta-se como a melhor solução no que diz respeito às necessidades de climatização.

- **Viseu**

Pela análise da Figura 6.50 é possível verificar que, de uma forma geral, a aplicação de PCM 21, PCM 23 e PCM 25 são aqueles que apresentam um melhor desempenho em termos de necessidades energéticas anuais, destacando a solução com PCM 23, conseguindo obter uma redução de  $1.95 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ .

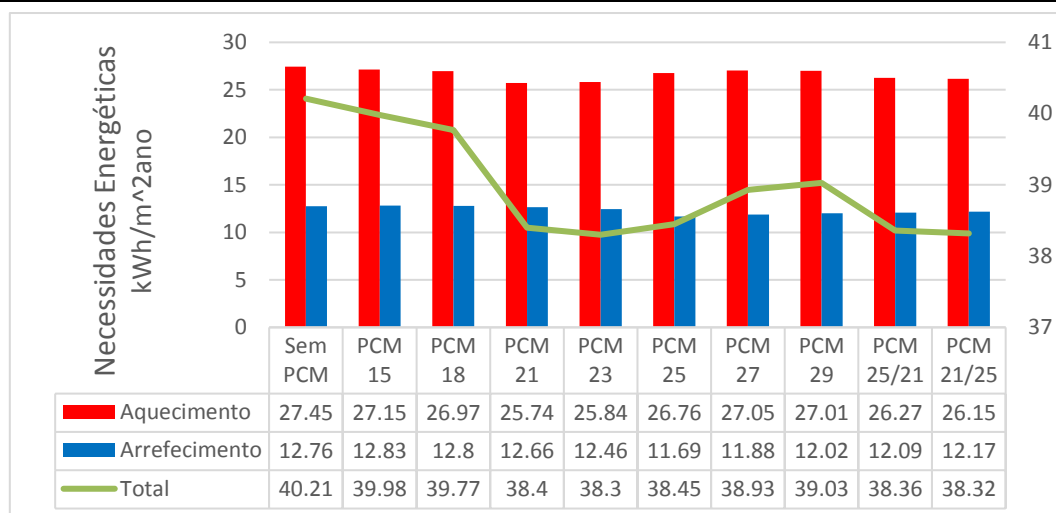


**Figura 6.50 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Viseu.**

Apesar de escolhida uma combinação que combina o PCM com o menor valor das necessidades de aquecimento (PCM 21) e o menor valor das necessidades de arrefecimento (PCM 25), a combinação de PCM 23/23 apresenta-se como a melhor solução no que diz respeito às necessidades de climatização.

- **Aveiro**

Pela análise da Figura 6.51 é possível verificar que, de uma forma geral, a aplicação de PCM 21, PCM 23 e PCM 25 são aqueles que apresentam um melhor desempenho em termos de necessidades energéticas anuais, destacando a solução com PCM 23, conseguindo obter uma redução de  $1.91 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ .

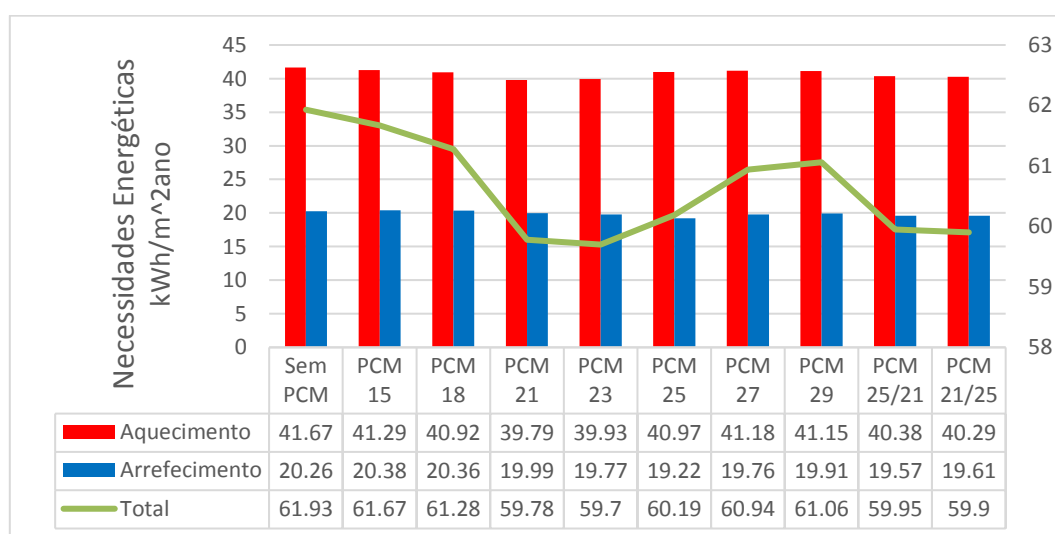


**Figura 6.51 – Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Aveiro.**

Apesar de escolhida uma combinação que combina o PCM com o menor valor das necessidades de aquecimento (PCM 21) e o menor valor das necessidades de arrefecimento (PCM 25), a combinação de PCM 23/23 apresenta-se como a melhor solução no que diz respeito às necessidades de climatização.

- **Lamego**

Pela análise da Figura 6.52 é possível verificar que, de uma forma geral, a aplicação de PCM 21, PCM 23 e PCM 25 são aqueles que apresentam um melhor desempenho em termos de necessidades energéticas anuais, destacando a solução com PCM 23, conseguindo obter uma redução de  $2.23 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ .

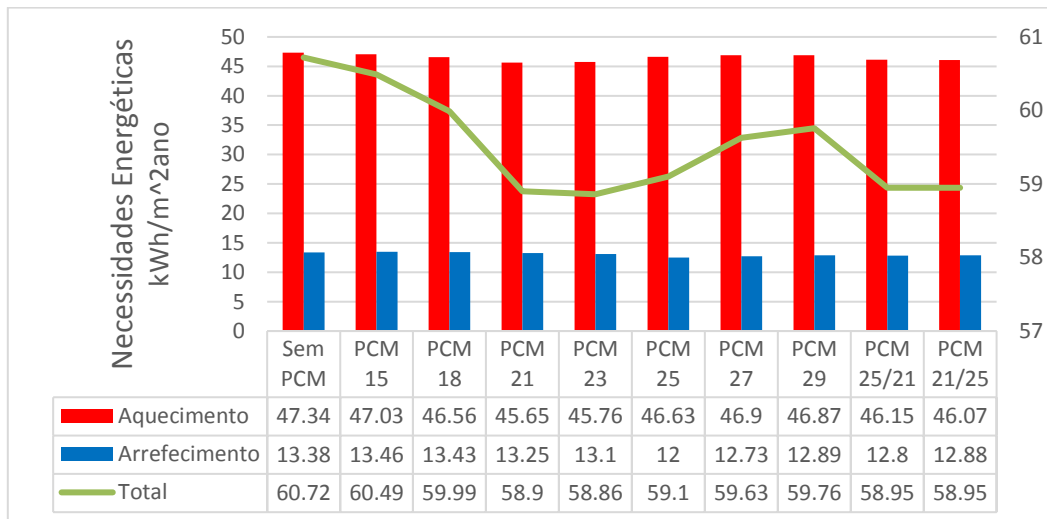


**Figura 6.52 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Lamego.**

Apesar de escolhida uma combinação que combina o PCM com o menor valor das necessidades de aquecimento (PCM 21) e o menor valor das necessidades de arrefecimento (PCM 25), a combinação de PCM 23/23 apresenta-se como a melhor solução no que diz respeito às necessidades de climatização.

- **Bragança**

Pela análise da Figura 6.53 é possível verificar que, de uma forma geral, a aplicação de PCM 21, PCM 23 e PCM 25 são aqueles que apresentam um melhor desempenho em termos de necessidades energéticas anuais, destacando a solução com PCM 23, conseguindo obter uma redução de  $1.86 \text{ kWh/m}^2 \text{ ano}$ .



**Figura 6.53 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, para Bragança.**

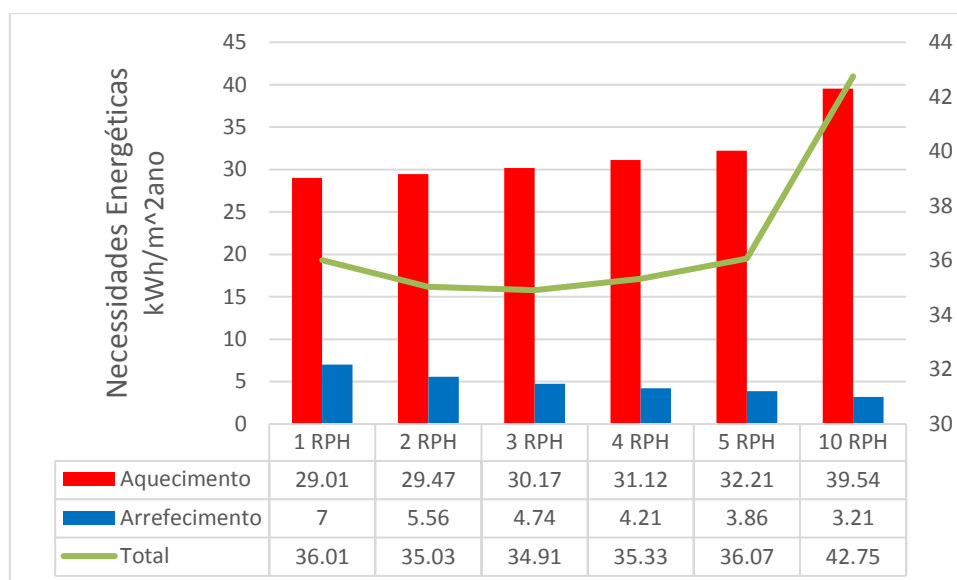
Apesar de escolhida uma combinação que combina o PCM com o menor valor das necessidades de aquecimento (PCM 21) e o menor valor das necessidades de arrefecimento (PCM 25), a combinação de PCM23/23 apresenta-se como a melhor solução no que diz respeito às necessidades de climatização.

## 6.2 Estudo de sensibilidade

### 6.2.1 Ventilação noturna

Nesta análise fez-se variar as renovações de ar por hora da célula em estudo, no período noturno, através de ventilação mecânica, com o objetivo de compreender e otimizar o impacto desta variação no funcionamento do PCM. Apesar de ter sido considerado

ventilação natural noturna, esta poderá não ser suficiente para otimizar os ciclos carga-descarga do PCM. Pela Figura 6.54 é possível verificar que o aumento da rph tem um efeito quase linear, sendo que o mínimo se situa nas 3 rph, com uma redução de 42% das necessidades de arrefecimento. A partir dos 3 rph, as necessidades de aquecimento crescem de forma mais expressiva em relação às necessidades de arrefecimento, o que se traduz num aumento de 37.5% das necessidades de aquecimento para o caso de 10 rph.



**Figura 6.54 – Variação das necessidades energéticas de climatização com as rph de ventilação noturna, de 1 a 10rph.**

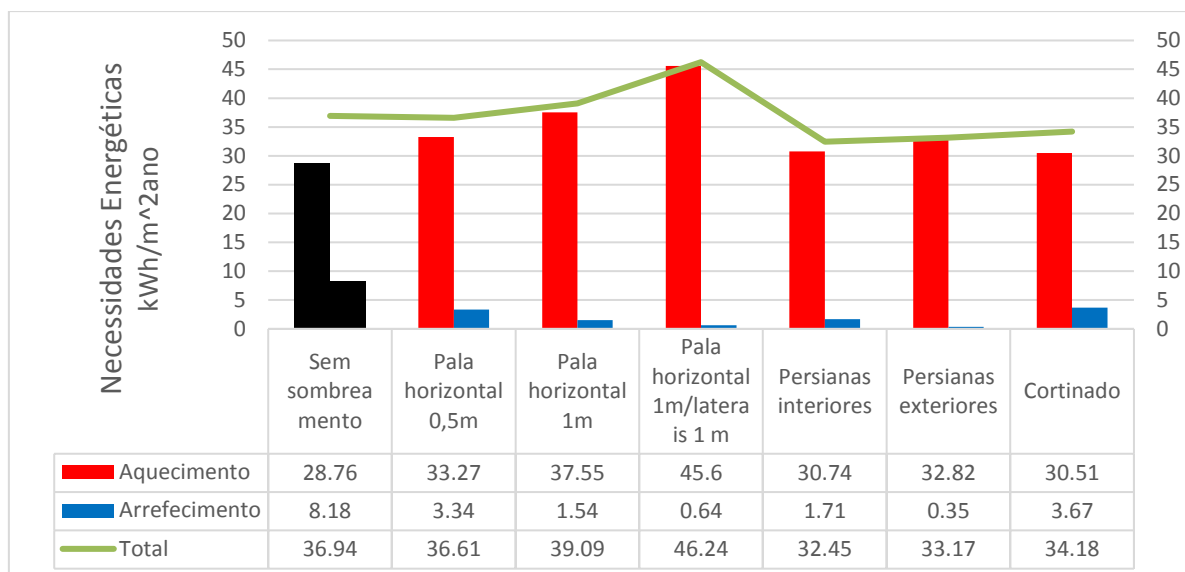
Assim, é possível concluir a importância da ventilação noturna na otimização do desempenho do PCM. De referir que apesar da redução pronunciada das necessidades de arrefecimento, uma vez que as necessidades de aquecimento assumem a maior fração das necessidades energéticas, esta redução é pouco significativa no total.

### 6.2.2 Elementos de proteção solar e sombreamento

Nesta análise foram estudadas estratégias em termos de limitação dos ganhos solares através de elementos de proteção solar e sombreamento. De salientar que a opção de persiana e cortinado foi apenas ativado durante o período do Verão.

Pela análise da Figura 6.55 é possível verificar que todos os elementos selecionados apresentam um decréscimo considerável face às necessidades de arrefecimento, destacando a opção de persianas exteriores, que praticamente anula, com uma redução de 95.7%. É também possível observar que a opção de persianas (interiores ou exteriores), bem como a opção de cortinado tem pouco impacto em relação às necessidades de

aquecimento, face á opção das palas, destacando a pala horizontal de 1 m com lateral de 1 m, com uma aumento de 58.5%.



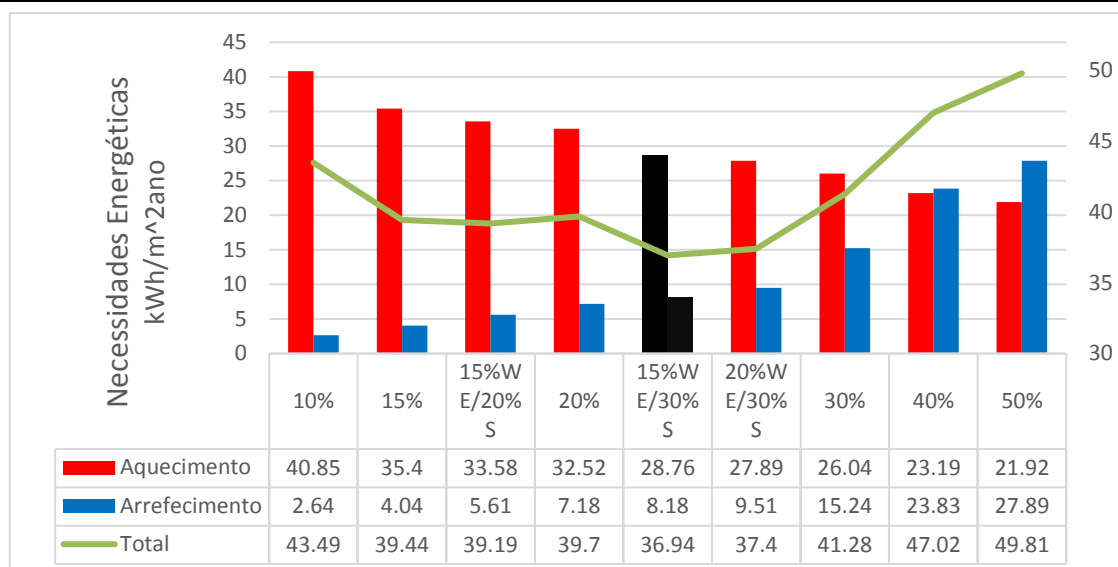
**Figura 6.55 – Variação das necessidades energéticas de climatização com o tipo de proteção solar/sombreamento.**

É possível concluir pela análise da Figura 6.55 que a opção mais vantajosa, em termos de limitação de ganhos solares e necessidades energéticas totais, será a implementação de persianas interiores, com uma redução de 12%.

### 6.2.3 Área do envidraçado

Nesta análise fez-se variar a área de envidraçado de forma a compreender de que forma a limitação ou exposição a ganhos solares seria benéfico para o funcionamento do PCM e para as exigências de climatização.

Pela análise da Figura 6.56 é possível verificar que à medida que a área de envidraçado aumenta, as necessidades de aquecimento diminuem e as necessidades de arrefecimento aumentam, como seria expectável face ao aumento da exposição a ganhos solares. As opções que fazem proveito de uma maior área de envidraçado a sul, diminuindo a área de envidraçado nas restantes zonas, são os que mais reduzem o total de necessidades de climatização.



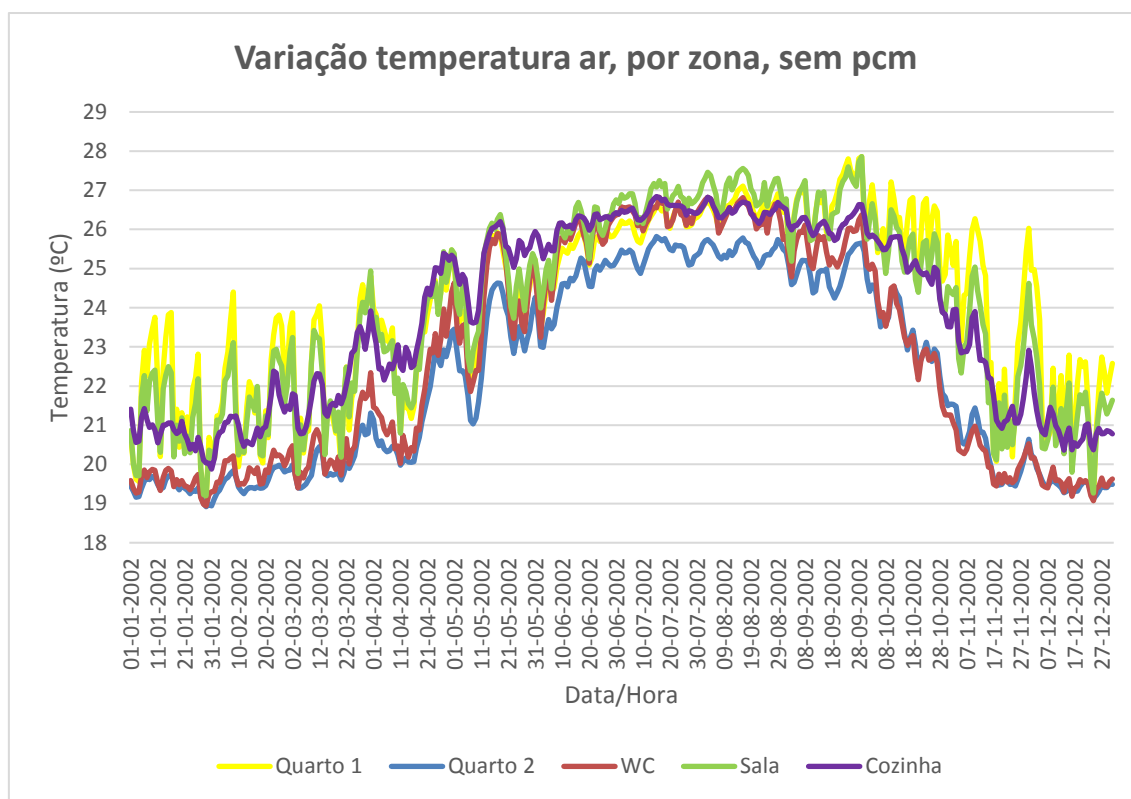
**Figura 6.56 – Variação das necessidades energéticas de climatização com área de envidraçado.**

É possível concluir que a melhor opção será a que dispõe de 30% de área de envidraçado na fachada a sul e 15% no quadrante a nascente e poente, que corresponde à opção adoptada no caso de estudo, marcada a negro.

## 6.3 Sistema ativo

### 6.3.1 Identificação das zonas desfavoráveis

Pela análise da Figura 6.57 é possível analisar quais as zonas térmicas mais desfavoráveis, tendo em conta a variação da temperatura do ar interior, podendo destacar a sala, quarto 1 e cozinha.



**Figura 6.57 - Variação da temperatura, sem PCM, por zona, ao longo do ano.**

Para o seguinte estudo foi analisado a incorporação de PCM na zona considerada mais desfavorável, a sala, uma vez que é a zona com os maiores picos de temperatura, conseguindo um maior nível de conforto térmico.

Tendo em conta os estudos efetuados ao longo deste trabalho e tendo em conta o aumento das necessidades de arrefecimento, fruto dos ganhos internos de calor associados a equipamentos, iluminação e ocupação, torna-se claro o estudo com uso de PCM 21, PCM 23 e PCM 25. Dessa forma foi estudado a incorporação destes PCMs na zona da sala, na parede e cobertura, otimizando uma solução.

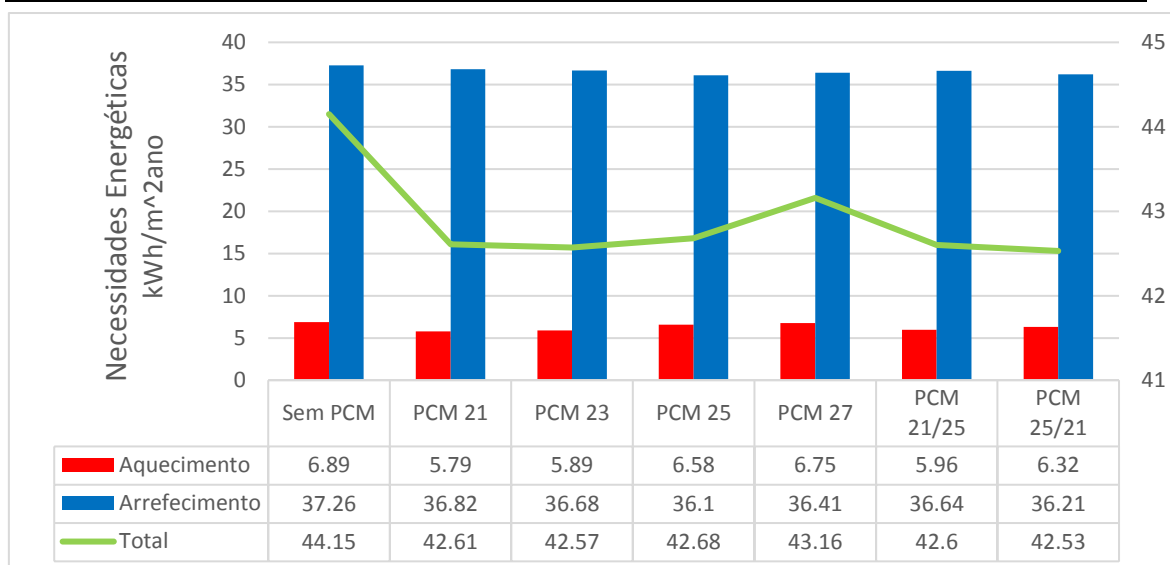


Figura 6.58 - Necessidades energéticas da célula de teste, com e sem PCM, com sistema ativo.

Pela análise da Figura 6.58 é possível observar que a combinação de PCM 25/21 apresenta-se com o melhor desempenho em termos de redução das necessidades de climatização, obtendo uma redução de  $1.62 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ .

### 6.3.2 Custos

Para finalizar, em relação aos custos, tendo em conta que o PCM 25 tem um custo de  $87\text{€/m}^2$  e que o PCM 21 tem um custo de  $100\text{€/m}^2$ . Assumindo a melhor solução, com a combinação PCM 25/21, teria um custo de 2364 € para as paredes e 1086€ para a cobertura, totalizando 3450€.

Esta combinação permite uma redução de  $1.62 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ , o que se irá traduzir numa redução de 144 kWh/ano. Assumindo que o preço do kWh é cerca de 0.16€, corresponderia a uma poupança de 23€/ano. Ou seja, seria necessário 150 anos para conseguir reaver o dinheiro investido, sem contabilizar com outros custos adicionais associados (instalação, manutenção, etc).

Conclui-se portanto que, para o presente estudo, o investimento de PCM não seria vantajoso, tendo em conta o elevado tempo de retorno financeiro. De salientar que, uma vez que foram adoptados valores de referência do REH, o edifício em estudo já teria necessidades energéticas baixas e por isso a aplicação de PCM teria pouco impacto no comportamento térmico e consequentemente nas necessidades energéticas. O *payback* seria mais interessante, caso o edifício fosse de inércia leve.



---

## *Capítulo 7*

### *Considerações finais e desenvolvimentos futuros*

## Capítulo 7. Considerações finais e desenvolvimentos futuros

### 7.1 Considerações finais

O objetivo deste trabalho consistia em contribuir para o aumento de conhecimento de materiais mudança de fase, no que respeita à sua potencial aplicação na construção, em clima português, respeitando a legislação nacional, no caso, o REH. A partir do conjunto de simulações consideradas foi possível atingir o objetivo, obtendo-se resultados que irão permitir uma avaliação e previsão do comportamento térmico e necessidades energéticas, face à aplicação de PCM.

Na primeira fase de estudo foi simulado uma célula de teste, com uma geometria simples, com o objetivo de comparar a eficiência dos PCMs mediante a sua localização numa camada. Foi possível verificar que quanto mais próximo do interior estiver aplicado, melhor será a capacidade de armazenamento térmico. Sendo que a opção de PCM pelo interior, na camada de cobertura e paredes, foi a melhor solução.

Na segunda fase, mantendo a mesma célula de teste, em sistema passivo, foram realizadas simulações, para os diferentes tipos de PCM, aplicados pelo interior, para as zonas climáticas em estudo. A simulação foi realizada para as semanas críticas, do verão e inverno (*Summer design week* e *Winter design week*). Na tabela Tabela 7.1 resume as soluções com PCM otimizada, para cada região.

**Tabela 7.1 – Temperaturas de fusão dos PCM com melhor desempenho nas semanas críticas do Verão e Inverno, em °C.**

	Lisboa	Porto	Évora	Viseu	Aveiro	Lamego	Bragança
Summer Design Week	25	25	27	27	25	27	25
Winter Design Week	18	18	18	18	21	18	18

De uma forma geral, na semana crítica do Verão, o PCM 25 e PCM 27 foram os que tiveram melhor desempenho, face às elevadas temperaturas, na medida de aproximar da zona de conforto. De salientar que, no caso de Évora e Lamego, são zonas climáticas do tipo V3 e por isso o grau de severidade do verão será superior aos restantes, daí a necessidade por um PCM com um ponto de fusão mais elevado. Na semana crítica de

Inverno o PCM 18 e PCM 21 assumem os melhores resultados. De referir o caso de Lisboa e Porto, onde o PCM 21 funcionou, no entanto o PCM 18 assumiu melhores resultados quando a temperatura diminuiu, afastando do ponto de fusão do PCM 21. Podemos concluir que a temperatura exterior, a temperatura do ar, radiação solar e o tempo que uma determinada temperatura é mantida, irão determinar a escolha e o funcionamento do PCM, sendo que quanto mais próximo do ponto de fusão estiver, melhor será a sua capacidade de armazenamento e a facilidade nos ciclos de fusão/solidificação.

Na terceira fase, é definido um novo critério para determinar a melhor solução, na diminuição das necessidades de climatização anual. Para isso é definido um sistema de climatização, com uma eficiência de 100% (COP=1), programado para manter a temperatura interior no intervalo de conforto entre 20°C e 25°C. Para além dos PCMs em estudo foi também definido uma solução ótima, que seria a combinação do PCM com melhor desempenho na estação de arrefecimento e o PCM com o melhor desempenho na estação de aquecimento. A Tabela 7.2 resume as soluções com PCM com maiores reduções das necessidades na estação de aquecimento e arrefecimento, bem como a melhor combinação na redução das necessidades de climatização anual.

**Tabela 7.2 - Temperaturas de fusão dos PCM com melhor desempenho nas estações de aquecimento e arrefecimento, em °C.**

	<b>Lisboa</b>	<b>Porto</b>	<b>Évora</b>	<b>Viseu</b>	<b>Aveiro</b>	<b>Lamego</b>	<b>Bragança</b>
Aquecimento	21	21	21	21	21	21	21
Arrefecimento	25	25	25	25	25	25	25
Anual	21/21	21/21	23/23	23/23	23/23	23/23	23/23

De uma forma geral, o PCM 21 e PCM 25 foram os que tiveram melhor desempenho, na estação de aquecimento e na estação de arrefecimento, respetivamente. No entanto, a melhor combinação, na medida de redução das necessidades, não está de acordo com os PCMs escolhidos. É possível concluir que quanto maior o grau de severidade da zona climática, maior será a necessidade de um PCM com um ponto de fusão maior.

Na quarta fase foi elaborado um estudo de sensibilidade, que seria composto por simulações com variação de alguns parâmetros. Numa primeira análise fez-se variar as renovações de ar por hora da célula de teste, no período noturno, através de ventilação

mecânica. Foi possível concluir que esta estratégia provou ser benéfica, com uma redução de 42% das necessidades de arrefecimento para 3rph. Este tipo de estratégia deverá ser prevista de forma a ajudar o PCM a descarregar e dessa forma potenciar o seu desempenho. No que diz respeito a estratégias de limitação de ganhos solares, revelou ser uma estratégia importante na redução das necessidades de arrefecimento, nomeadamente o caso das persianas exteriores com uma redução de 95.7%. De salientar que, uma vez que a célula de teste se encontra isolada, será susceptível a um excesso de radiação solar e consequentemente a um sobreaquecimento. Dessa forma, mediante uma situação semelhante, poderá ser uma estratégia a ser contabilizada, na medida de reduzir a sobrecarga do PCM, facilitando os ciclos de fusão/solidificação. Numa última análise fez-se variar a área do envidraçado e foi possível concluir que a solução adoptada para célula de teste foi a melhor, em termos de necessidades energéticas, nomeadamente 30% da área da parede na fachada sul e 15% da área da parede nos quadrantes a Nascente e Poente.

Numa última fase, foi considerado um sistema ativo, com ocupação, iluminação e utilização de equipamentos. Nesta fase foi estudado a célula de teste por zonas, seleccionando a zona mais desfavorável, para aplicação de PCM. Foi concluído que a zona mais desfavorável seria a sala, uma vez que possui os maiores picos de temperatura e como se trata de uma zona comum, será importante manter um nível de conforto térmico. Assim foi determinado que o PCM 25/21 seria a melhor escolha, obtendo uma redução de  $1.62 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ . De salientar que a melhor combinação tem como opção para a parede o PCM com maior ponto de fusão (PCM25), algo que não aconteceu nas anteriores análises. Este facto deve-se às necessidades de arrefecimento serem mais elevadas, daí a necessidade de aplicação na zona com mais área, obtendo uma maior redução das necessidades de climatização anual. Em termos de custos foi concluído que este tipo de investimento não seria benéfico, face ao elevado custo do material.

## **7.2 Desenvolvimentos futuros**

Para desenvolvimento de trabalhos futuros, deverão ser estudadas outras soluções construtivas, com diferentes tipos de PCM, com pontos de fusão variáveis, nomeadamente na gama de valores de 21°C a 27°C. Será interessante realizar estudos paramétricos em edifícios de serviços, uma vez que com maiores cargas térmicas e necessidades energéticas, o impacto da aplicação deste tipo de material seria mais vantajoso. No que diz respeito à célula de teste seria interessante adoptar uma solução

mais realista, nomeadamente num espaço urbano, com outros elementos/edifícios na sua envolvente. Tendo em conta que grande parte das simulações foram realizadas avaliando as necessidades de climatização com aplicação de um sistema AVAC, seria importante avaliar as reduções obtidas para cada tipo de sistema, com a incorporação de PCM. Tendo em conta a temática dos edifícios com necessidades energéticas quase nulas (NZEB – *Nearly Zero Energy Buildings*), será interessante estudar o papel dos PCMs no alcance destes edifícios. Apesar do uso de *softwares* de simulação fornecerem uma previsão do comportamento do material em estudo e do edifício, será importante realizar uma campanha laboratorial ou monitorização “in situ” para calibrar os modelos numéricos e estudos paramétricos, de forma a obter resultados mais rigorosos.



---

## *Referências bibliográficas*





---

**Referências bibliográficas**

- AGYENIM, F., HEWITT, N., EAMES, P. & SMYTH, M. 2010. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 615-628.
- ASKEW, G. 1978. Solar heating utilization a paraffin's phase change material. *Proceedings of the second national passive solar conference*. Philadelphia, PA.
- BAETENS, R., JELLE, B. P. & GUSTAVSEN, A. 2010. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42, 1361-1368.
- BANASZEK, J., FURMAŃSKI, P. & REBOW, M. 2005. *Modelling of transport phenomena in cooled and solidifying single component and binary media*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- BOURDEAU, L. E. 1980. Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage. In: J. HAYES & R. SNYDER (eds.) *Proceedings of the fifth national passive solar conference*. Amherst. Newark, DE: American Solar Energy Society.
- BRUNO, F. & SAMAN, W. 2002. Testing of a PCM energy storage system for space heating. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII*. Cologne (Germany).
- CABEZA, L. F., CASTELL, A., BARRENECHE, C., DE GRACIA, A. & FERNÁNDEZ, A. I. 2011. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1675-1695.
- CABEZA, L. F., CASTELLÓN, C., NOGUÉS, M., MEDRANO, M., LEPPERS, R. & ZUBILLAGA, O. 2007. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39, 113-119.
- DRAGE, G. 2009. *Phase Change Material Used in Temperature Controlled Packaging & Transport* [Online]. Environmental services industry community.
- ENIBE, S. O. 2003. Thermal analysis of a natural circulation solar air heater with phase change material energy storage. *Renewable Energy*, 28, 2269-2299.
- ENVIENERGY. Available: <http://www.envienergy.com>.
- FARID, M. M. & CHEN, X. D. 1999. Domestic electrical space heating with heat storage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 213, 83-92.
- FARID, M. M., KHUDHAIR, A. M., RAZACK, S. A. K. & AL-HALLAJ, S. 2004. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45, 1597-1615.
- FAROUK, B. & GUCERI, S. 1979. Tromb-Michal wall using a phase change material. *Proceedings of the second Miami international conference on alternative energy*. Miami.
- FATH, H. E. S. 1995. Transient analysis of thermosyphon solar air heater with built-in latent heat thermal energy storage system. *Renewable Energy*, 6, 119-124.

- FATH, H. E. S. 1998. Technical assessment of solar thermal energy storage technologies. *Renewable Energy*, 14, 35-40.
- FOK, S. C., SHEN, W. & TAN, F. L. 2010. Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 109-117.
- GHONEIM, A. A., KLEIN, S. A. & DUFFIE, J. A. 1991. Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials. *Solar Energy*, 47, 237-242.
- GIL, A., MEDRANO, M., MARTORELL, I., LÁZARO, A., DOLADO, P., ZALBA, B. & CABEZA, L. F. 2010. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 31-55.
- GONÇALVES, H. & GRAÇA, J. M. 2004. Conceitos bioclimáticos para os Edifícios em Portugal.
- GURRUM, S. P., JOSHI, Y. K. & KIM, J. 2002. THERMAL MANAGEMENT OF HIGH TEMPERATURE PULSED ELECTRONICS USING METALLIC PHASE CHANGE MATERIALS. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 42, 777-790.
- HALFORD, C. K. & BOEHM, R. F. 2005. Modeling of Phase Change Material Peak Load Shifting. *ASME Conference Proceedings*, 2005, 25-32.
- HARIRI, A. S. & WARD, I. C. 1988. A review of thermal storage systems used in building applications. *Building and Environment*, 23, 1-10.
- HASAN, A., MCCORMACK, S. J., HUANG, M. J. & NORTON, B. 2010. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 84, 1601-1612.
- HAWES, D. W., FELDMAN, D. & BANU, D. 1993. Latent heat storage in building materials. *Energy and Buildings*, 20, 77-86.
- HOSHI, A., MILLS, D. R., BITTAR, A. & SAITOH, T. S. 2005. Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR. *Solar Energy*, 79, 332-339.
- [HTTP://WWW.RUBITHERM.EU/](http://www.rubitherm.eu/).
- HUANG, M. J., EAMES, P. C. & HEWITT, N. J. 2006. The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 1951-1960.
- HUANG, M. J., EAMES, P. C. & NORTON, B. 2004. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2715-2733.
- ISMAIL, K. A. R. & HENRÍQUEZ, J. R. 2001. Thermally effective windows with moving phase change material curtains. *Applied Thermal Engineering*, 21, 1909-1923.
- JACKSON III, W. B., GOULD, R.D. AND MULLIGAN, J.C. 2002. Performance of an octacosane based micro PCM fluid for cooling EV electronics. *8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*. St. Louis, Missouri.

- JEON, J., LEE, J.-H., SEO, J., JEONG, S.-G. & KIM, S. 2012. Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-10.
- JUNGHANSS, T., UM BOOCK, A., VOGEL, M., SCHUETTE, D., WEINLAEDER, H. & PLUSCHKE, G. 2009. Phase Change Material for Thermoerapy of Buruli Ulcer: A Prospective Observational Single Centre Proof-of-Principle Trial. *PLoS Negl Trop Dis*, 3, e380.
- JURINAK, J. J. & ABDEL-KHALIK, S. I. 1978. Properties optimization for phase-change energy storage in air-based solar heating systems. *Solar Energy*, 21, 377-383.
- KANDASAMY, R., WANG, X.-Q. & MUJUMDAR, A. S. 2008. Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1047-1057.
- KANG, Y., YI, J. & YINPING, Z. 2003. Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system. *Energy and Buildings*, 35, 417-425.
- KENISARIN, M. & MAHKAMOV, K. 2007. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1913-1965.
- KENISARIN, M. M. 2010. High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 955-970.
- KHARE, S., DELL'AMICO, M., KNIGHT, C. & MCGARRY, S. 2012. Selection of materials for high temperature latent heat energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107, 20-27.
- KHUDHAIR, A. M. & FARID, M. M. 2004. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 45, 263-275.
- KISSOCK, J., HAMMING, J., WHITNEY, T. & DRAKE, M. 1998. Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings. *Proceedings of the international solar energy conference*. New York, USA.
- KUZNIK, F., DAVID, D., JOHANNES, K. & ROUX, J.-J. 2011. A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 379-391.
- LIN, K., ZHANG, Y., XU, X., DI, H., YANG, R. & QIN, P. 2005. Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. *Energy and Buildings*, 37, 215-220.
- MCDERMOTT, M. B. 1997. *Heat retentive food service base device*. United States patent application.
- MICHELS, H. & PITZ-PAAL, R. 2007. Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants. *Solar Energy*, 81, 829-837.
- MICROTEK LABORATORIES, I. 2010. Encapsulated Phase Change Materials. Microtek Laboratories, Inc.
- MONDAL, S. 2008. Phase change materials for smart textiles – An overview. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1536-1550.

- OLIVER, A., NEILA, F. J. & GARCÍA-SANTOS, A. 2012. *Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica*.
- OSTERMAN, E., TYAGI, V. V., BUTALA, V., RAHIM, N. A. & STRITH, U. 2012. Review of PCM based cooling technologies for buildings. *Energy and Buildings*, 49, 37-49.
- PAL, D. & JOSHI, Y. Application of phase change materials for passive thermal control of plastic quad flat packages (PQFP): a computational study. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1995. SEMI-THERM XI., Eleventh Annual IEEE, 7-9 Feb 1995 1995. 65-71.
- PASUPATHY, A., ATHANASIOS, L., VELRAJ, R. & SEENIRAJ, R. V. 2008a. Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 28, 556-565.
- PASUPATHY, A., VELRAJ, R. & SEENIRAJ, R. V. 2008b. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 39-64.
- PHASECHANGEENERGY.COM. *phasechangeenergy.com* [Online].
- PILLAI, K. K. & BRINKWORTH, B. J. 1976. The storage of low grade thermal energy using phase change materials. *Applied Energy*, 2, 205-216.
- REGIN, A. F., SOLANKI, S. C. & SAINI, J. S. 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2438-2458.
- SALUNKHE, P. B. & SHEMAKAR, P. S. 2012. A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5603-5616.
- SALYER, I. & SIRCAR, A. 1990. Phase change material for heating and cooling of residential buildings and other applications. *Proceedings of the 25th intersociety energy conservation engineering conference*.
- SALYER, I. O. 1996. *Thermoplastic, moldable, non-exuding phase change materials*. United States patent application.
- SÁNCHEZ, P., SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, M. V., ROMERO, A., RODRÍGUEZ, J. F. & SÁNCHEZ-SILVA, L. 2010. Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules. *Thermochimica Acta*, 498, 16-21.
- SHAPIRO, M., FELDMAN, D., HAWES, D. W. & BANU, D. 1987. PCM thermal storage in wallboard. *Proceedings of the 12th passive solar conference*. Portland.
- SHARMA, A., TYAGI, V. V., CHEN, C. R. & BUDDHI, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.
- SHI, W., HOU, J. & ZHANG, X. 2010. Properties of paraffin phase-change-material(PCM) mass concrete for temperature control. *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, 414-417.

- STRITIH, U. & NOVAK, P. 1996. Solar heat storage wall for building ventilation. *World renewable energy congress (WREC)*.
- SWET, J. 1980. Phase change storage in passive solar architecture. *Proceedings of the 5th national passive solar conference*. Massachusetts: Amhearst.
- TAN, F. L. & TSO, C. P. 2004. Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 24, 159-169.
- TAYLOR, P., FULLER, R. J. & LUTHER, M. B. 2008. Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. *Energy and Buildings*, 40, 793-800.
- TELKES, M. 1975. *Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, Charlottesville, Virginia, April 16-18, 1975*, The Society.
- TYAGI, V. V. & BUDDHI, D. 2007. PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1146-1166.
- TYAGI, V. V., BUDDHI, D., KOTHARI, R. & TYAGI, S. K. 2012. Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: An experimental study. *Energy and Buildings*, 51, 248-254.
- VAKILALTOJJAR, S. M. & SAMAN, W. 2001. Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications. *Applied Thermal Engineering*, 21, 249-263.
- WAGNER, A., GOSSAUER, E., MOOSMANN, C., GROPP, T. & LEONHART, R. 2007. Thermal comfort and workplace occupant satisfaction—Results of field studies in German low energy office buildings. *Energy and Buildings*, 39, 758-769.
- WANG, X.-Q., MUJUMDAR, A. S. & YAP, C. 2007. Effect of orientation for phase change material (PCM)-based heat sinks for transient thermal management of electric components. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34, 801-808.
- WANG, X.-Q., YAP, C. & MUJUMDAR, A. S. 2008. A parametric study of phase change material (PCM)-based heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1055-1068.
- WEINLÄDER, H., BECK, A. & FRICKE, J. 2005. PCM-facade-panel for daylighting and room heating. *Solar Energy*, 78, 177-186.
- [WWW.BASF.COM](http://WWW.BASF.COM).
- [WWW.CLIMATOR.COM](http://WWW.CLIMATOR.COM).
- [WWW.CRISTOPIA.COM](http://WWW.CRISTOPIA.COM).
- [WWW.DESIGNBUILDER.CO.UK/](http://WWW.DESIGNBUILDER.CO.UK/).
- [WWW.EPSLTD.CO.UK](http://WWW.EPSLTD.CO.UK).
- [WWW.M-KAGAKU.CO.JP](http://WWW.M-KAGAKU.CO.JP).
- [WWW.MICROPOLIS.PT](http://WWW.MICROPOLIS.PT).
- [WWW.RUBITHERM.DE](http://WWW.RUBITHERM.DE).
- [WWW.TEAPPCM.COM](http://WWW.TEAPPCM.COM).

- WYATT, B. W. 1991. *Heat retentive server with phase change core*. United States patent application.
- ZALBA, B. 2002. *Almacenamiento térmico de energia mediante cambio de fase, Procedimiento experimental*. Ph.D.Thesis, University of Zaragoza (Spain).
- ZALBA, B., MARÍN, J. M., CABEZA, L. F. & MEHLING, H. 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251-283.
- ZALBA, B., MARÍN, J. M., CABEZA, L. F. & MEHLING, H. 2004. Free-cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, 27, 839-849.
- ZHOU, D., ZHAO, C. Y. & TIAN, Y. 2012. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593-605.
- ZHOU, G., YANG, Y., WANG, X. & ZHOU, S. 2009. Numerical analysis of effect of shape-stabilized phase change material plates in a building combined with night ventilation. *Applied Energy*, 86, 52-59.
- ZHU, N., MA, Z. & WANG, S. 2009. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review. *Energy Conversion and Management*, 50, 3169-3181.

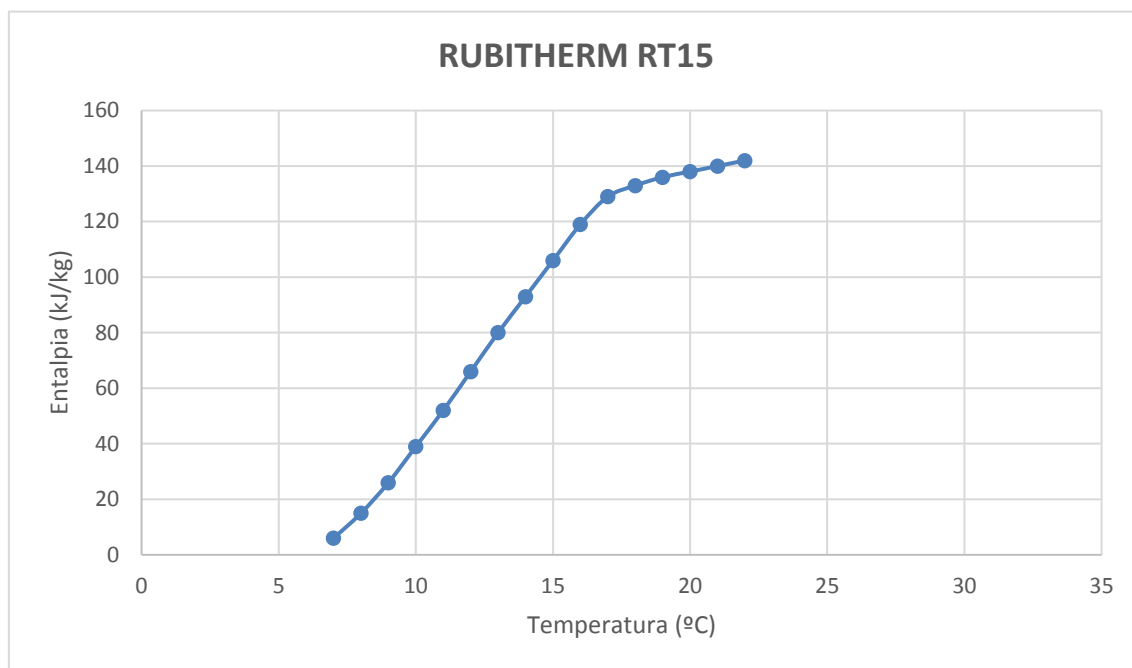
---

*Anexos*

*Anexo A*

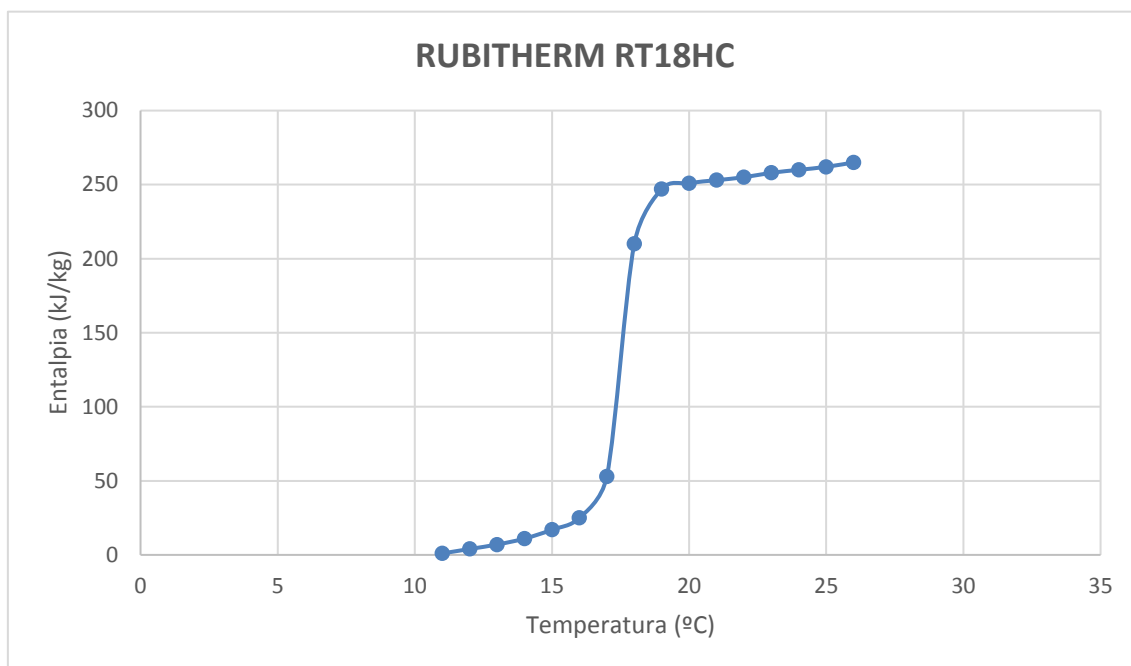
## A. Anexos

### A.1 Curvas temperatura-entalpia dos PCM utilizados

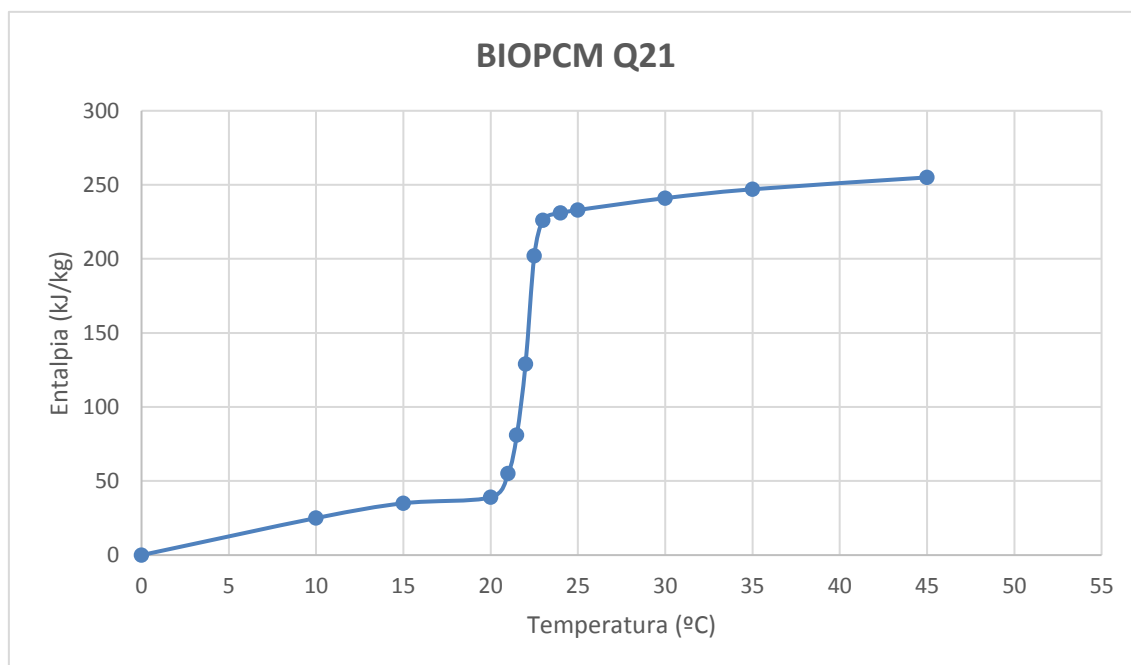


**Figura A.1 – Curva temperatura-entalpia do PCM Rubitherm RT15**

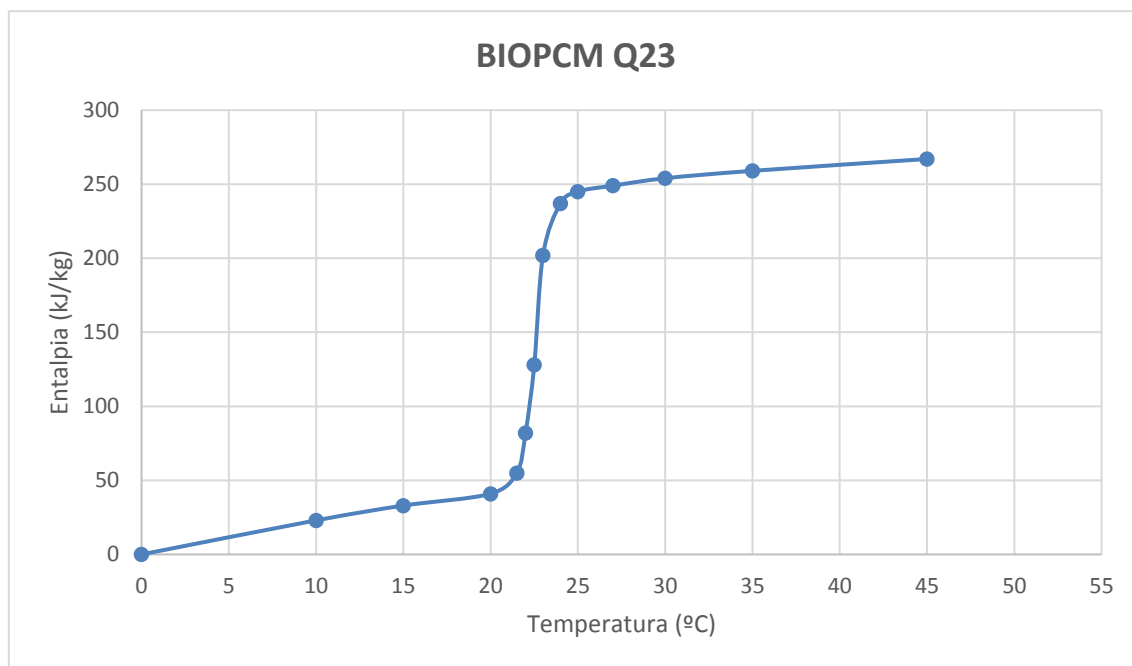




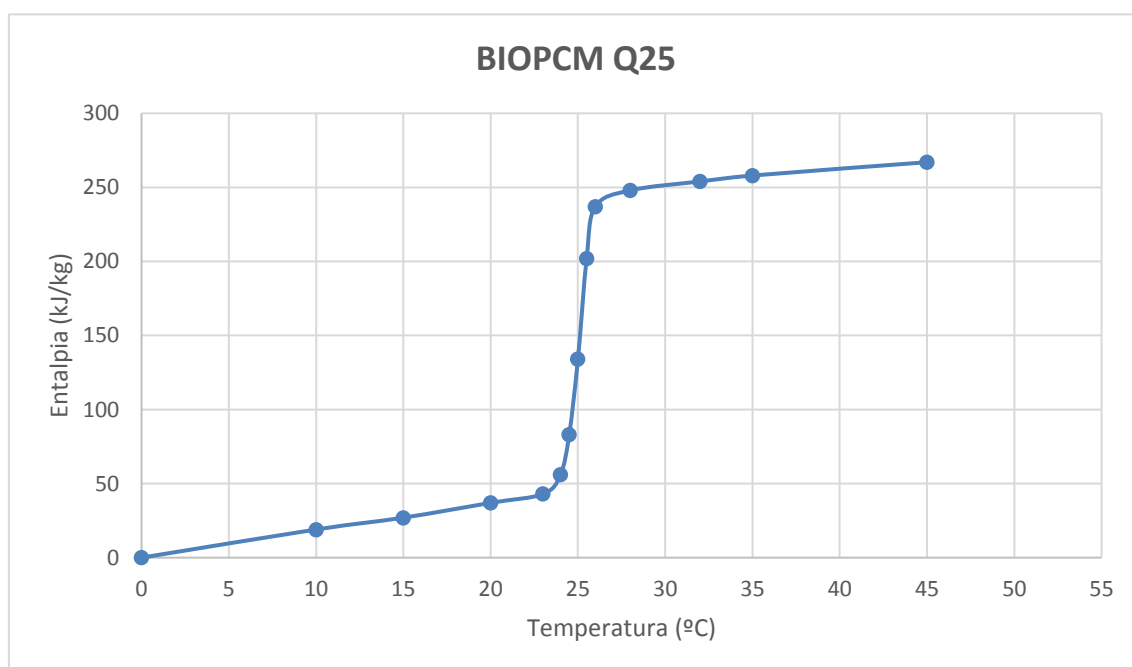
**Figura A.2 - Curva temperatura-entalpia do PCM Rubitherm RT18HC**



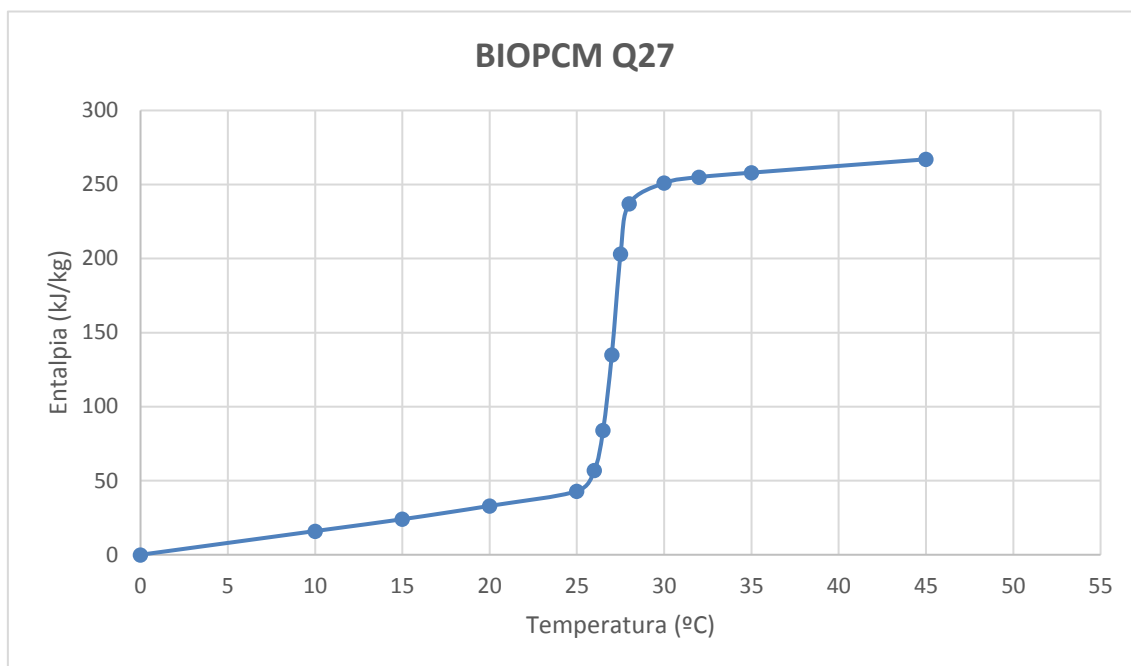
**Figura A.3 - Curva temperatura-entalpia do PCM BioPCM Q21**



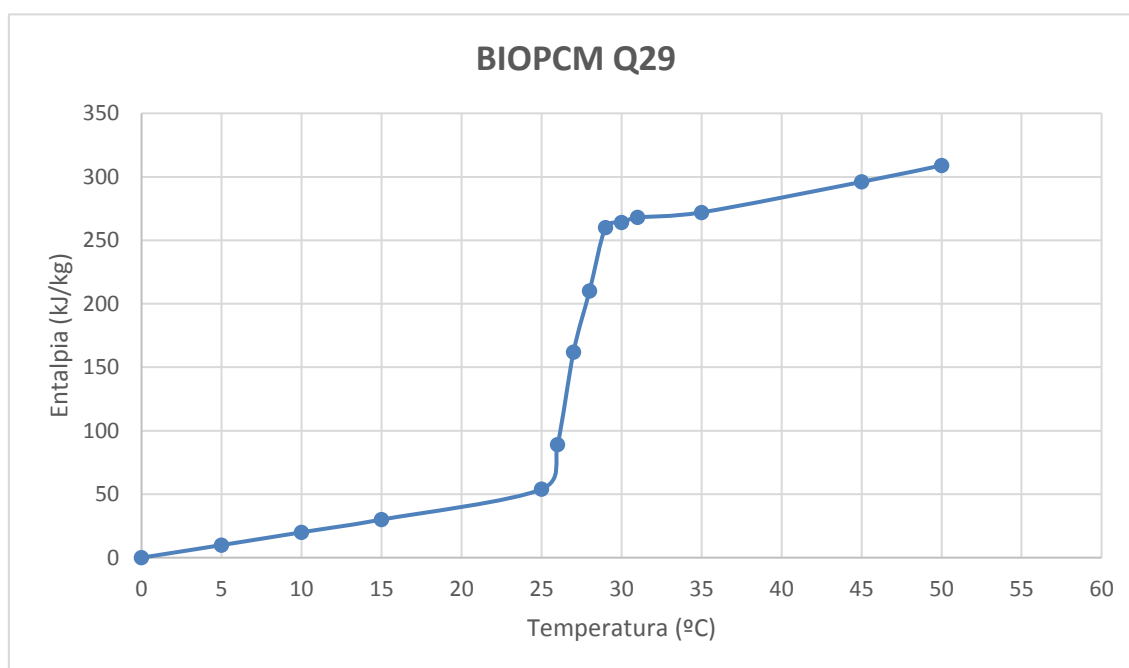
**Figura A.4 - Curva temperatura-entpia do PCM BioPCM Q23**



**Figura A.5 - Curva temperatura-entpia do PCM BioPCM Q25**



**Figura A.6 - Curva temperatura-entalpia do PCM BioPCM Q27**



**Figura A.7 - Curva temperatura-entalpia do PCM BioPCM Q29**

## A.2 Radiação solar na semana crítica de inverno

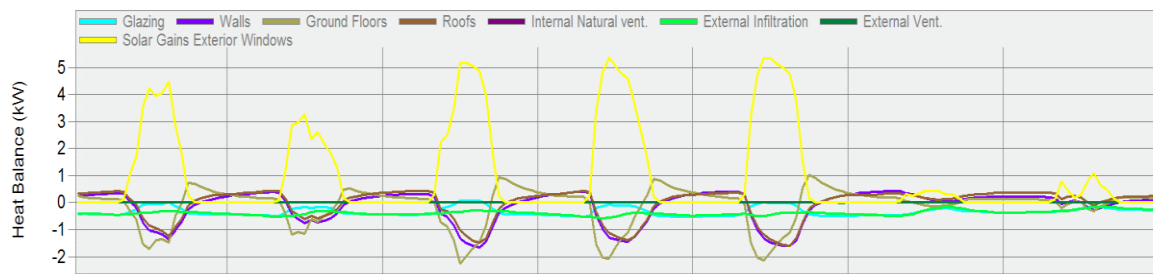


Figura A.8 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 22-28 Janeiro, em Lisboa.

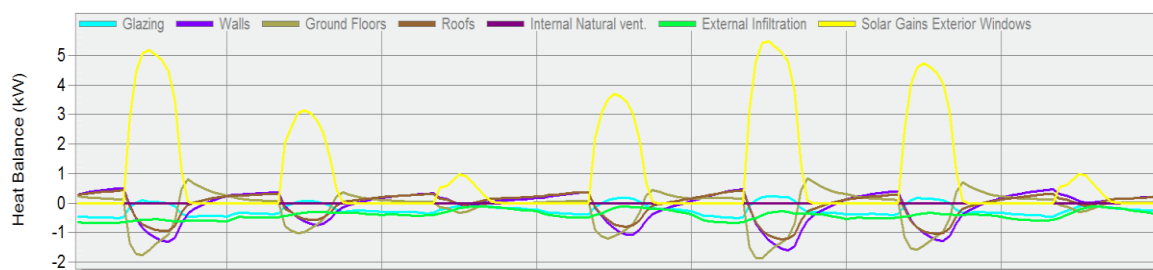


Figura A.9 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 01-07 Janeiro, no Porto.

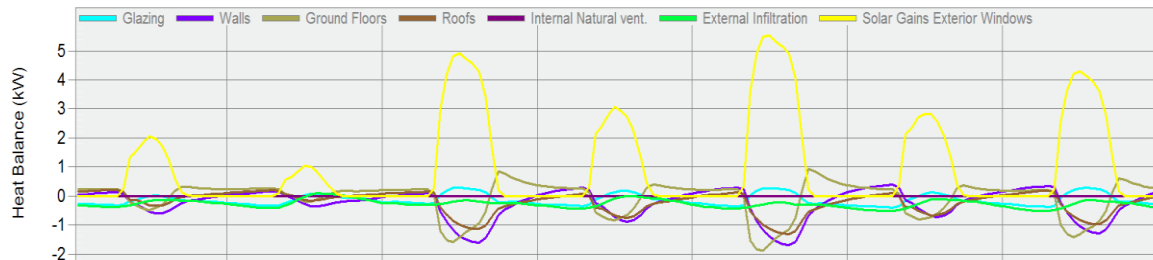


Figura A.10 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 15-21 Janeiro, em Évora.

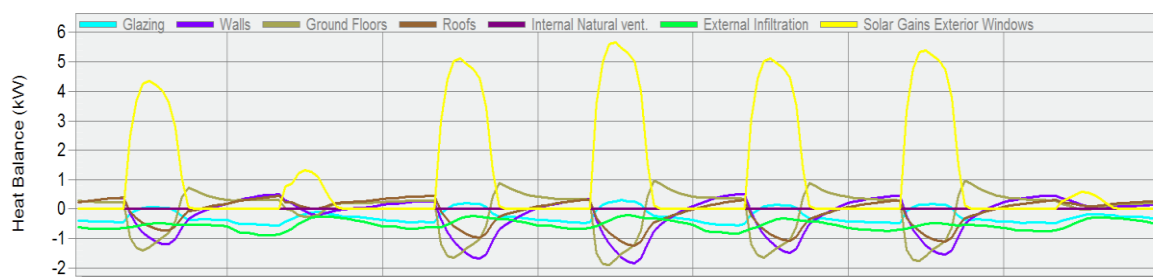
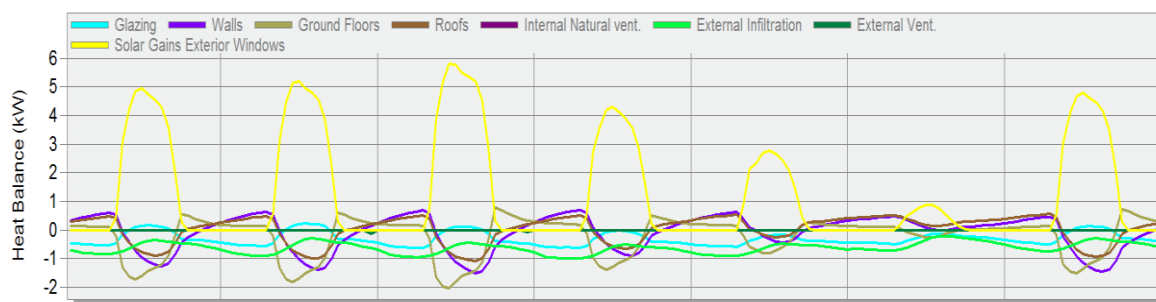
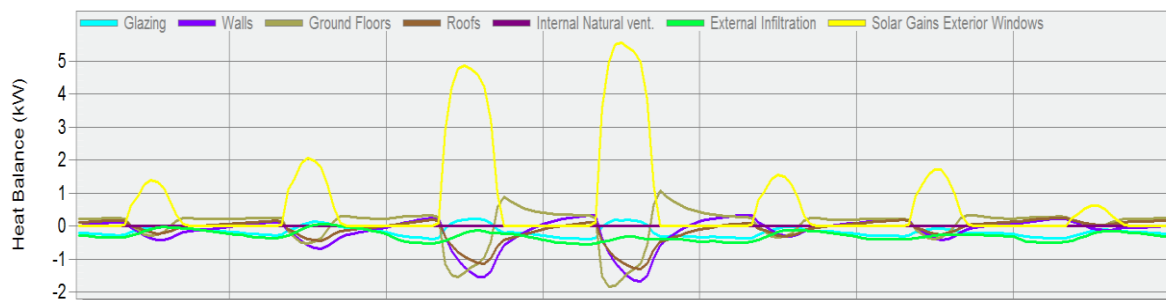


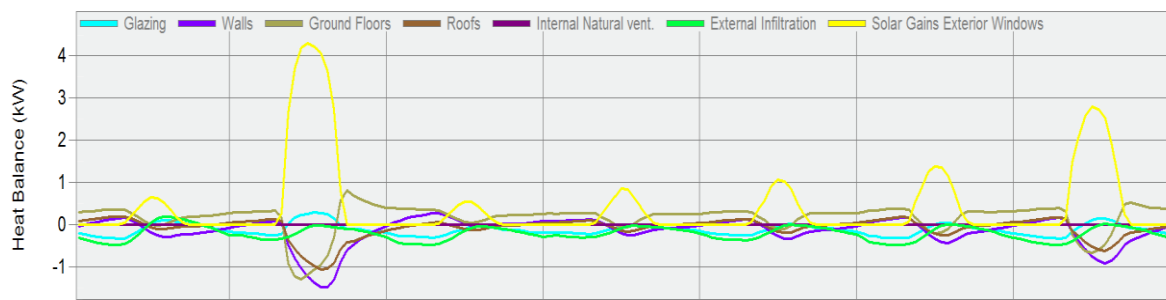
Figura A.11 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 06-12 Janeiro, no Viseu.



**Figura A.12 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 5-11 Fevereiro, em Aveiro.**



**Figura A.13 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 22-28 Dezembro, em Lamego.**



**Figura A.14 - Variação da radiação solar, ao longo da semana mais fria, 8-14 Dezembro, em Bragança.**